J. CLAUDEL

FORMULES
TABLES ET
RENSEIGNEMENTS
PRATIQUES

1857
CLA
For

450



1857 CLA F02

R. 736

2204

# FORMULES,

## TABLES ET RENSEIGNEMENTS PRATIQUES;

AIDE-MÉMOIRE

DES INGÉNIEURS, DES ARCHITECTES, ETC.

J. Claudel. **Introduction théorique et pratique à la science de l'ingénieur,** 1 beau volume in-8°, avec 425 figures intercalées dans le texte ; 2e édition. Prix : 9 fr.

J. Claudel et L. Laroque. **Pratique de l'art de construire. Maçonnerie.** 1 beau volume in-8°, avec 138 figures intercalées dans le texte. Prix : 7 fr.

J. Claudel et Séguin aîné. **Table des carrés et des cubes des nombres entiers successifs de 1 à 10000.** 1 volume in-8°. Prix : 3 fr. 50 c.

J. Claudel et F. Lecoy. **Comptes faits.** Table des produits des nombres entiers de 1 à 1000 par les nombres entiers de 1 à 100. 1 volume in-8°. Prix : 4 fr. 50 cent.

Paris. — Imprimé par E. Thunot et Ce, rue Racine, 26.

62/72

# FORMULES,

## TABLES

ET

# RENSEIGNEMENTS PRATIQUES;

AIDE-MÉMOIRE

DES INGÉNIEURS, DES ARCHITECTES, ETC.

PAR J. CLAUDEL,

Ingénieur civil, ancien élève de l'École centrale des arts et manufactures
Professeur de mécanique à l'Association philotechnique.

QUATRIÈME ÉDITION

REVUE ET CONSIDÉRABLEMENT AUGMENTÉE.

PARIS.

VICTOR DALMONT, ÉDITEUR,

Successeur de Carilian-Gœury et Vor Dalmont,

LIBRAIRE DES CORPS IMPÉRIAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES,

**Quai des Augustins, no 49.**

1857

# INTRODUCTION

DE LA PREMIÈRE ÉDITION.

---

L'art de bien construire repose sur un certain nombre de principes, qui servent de base aux règles pratiques à suivre dans l'établissement d'un projet quelconque : depuis la machine la plus élémentaire jusqu'à la plus compliquée, de l'atelier du simple ouvrier jusqu'à ces usines et fabriques où des milliers de bras utilisent la force de moteurs qui étonnent par leur puissance et leurs mouvements majestueux, du chemin de culture aux belles lignes de chemin de fer, de la chétive habitation rustique aux palais les plus somptueux.

De ces principes, on conclut, d'après des considérations théoriques, des règles générales, invariables, que la pratique modifie selon les diverses circonstances qui se rattachent à chacune d'elles.

Les règles théoriques s'expriment par des formules, également invariables, que posent ces hommes qui savent si bien analyser toutes les causes qui participent à un effet. Les règles pratiques s'expriment par les mêmes formules, mais en y faisant intervenir un coefficient pour tenir compte des circonstances que l'on ne peut analyser théoriquement : si l'on veut avoir, par exemple, le travail produit par la vapeur dans une machine à vapeur, il faut affecter l'expression théorique du travail qu'elle développe dans le cylindre d'un coefficient qui

dépend du frottement des pièces de la machine, du refroidissement, des pertes de vapeur, etc., et qui, par suite, varie avec le système, les soins d'entretien et la force de la machine; si l'on calcule la section à donner à une pièce pour résister à un effort donné, il faut, pour tenir compte de la non-homogénéité de la matière, multiplier le résultat théorique par un coefficient qui varie selon la nature de la pièce, son mode de résister, et le degré de stabilité qu'on veut obtenir.

Quelques règles sont empiriques, c'est-à-dire que les formules qui les expriment sont posées de manière à représenter, aussi exactement que possible, les relations qui existent entre différents résultats pratiques, sans avoir égard à aucune considération théorique : telles sont les formules qui lient la température de la vapeur d'eau à sa force élastique (n° 272).

Autant que l'on peut, il faut déduire les formules pratiques des formules théoriques, parce que ces dernières généralisent, au lieu que celles purement pratiques ne font que réunir des résultats obtenus dans des cas particuliers, et qui souvent varient d'un lieu à un autre, d'une matière à une autre, en un mot suivant les mille circonstances différentes qui se présentent dans les applications.

Ainsi la pratique doit s'appuyer sur la théorie; c'est en partant de ce point de vue que nous avons rédigé ce recueil de formules, tables et renseignements, afin qu'il soit utile aux savants, que les ingénieurs et architectes y trouvent des règles sûres pour établir leurs projets, et les constructeurs et ouvriers, tous les renseignements nécessaires à la bonne exécution de leurs travaux.

Nous avons, autant qu'il nous a été possible, cité l'auteur de chaque formule et de chaque renseignement, d'abord pour lui attribuer le mérite de son œuvre, et ensuite parce qu'on retient mieux et applique plus sûrement une règle quand on connaît la source d'où elle découle; si nous avons fait quelques omissions, nous prions les personnes qui y sont intéressées de vouloir bien nous les faire connaître; c'est également avec la plus vive recon-

naissance que nous recevrons leurs observations sur ce qui se trouve dans notre ouvrage, et les documents qui peuvent ne pas être à notre connaissance.

L'art de construire se divise en plusieurs parties ; mais il y a des règles qui sont communes à toutes, et d'autres qui ne diffèrent que légèrement dans plusieurs d'entre elles; c'est afin de ne pas faire double emploi, et de bien montrer l'analogie qui existe entre les mêmes règles appliquées dans diverses circonstances, que nous les avons toutes réunies dans un même volume. En suivant ces règles, les ingénieurs, les architectes et les constructeurs mettront en harmonie les différentes parties de leurs projets, donneront des dimensions convenables et des formes agréables à leurs pièces, et emploieront partout judicieusement la matière, d'où naîtra l'agréable, la commodité, la sécurité et l'économie.

Ouvrier d'abord, nous avons senti l'utilité de ce recueil ; ingénieur, nous en comprenons toute l'importance ; c'est ce qui nous a décidé à entreprendre un travail aussi pénible que difficile; heureux si nous avons atteint le but que nous nous étions proposé, car nous épargnerons du temps aux personnes qui sont à même de consulter des ouvrages spéciaux sur l'art de construire, et nous viendrons en aide à tous ces hommes laborieux qui se trouvent jusque dans les provinces les plus reculées, et qui, malgré leur talent naturel et leur pratique, ne commettent que trop souvent des erreurs dans les dispositions qu'ils adoptent et dans la manière dont ils emploient les matériaux. Si nous nous sommes rendu utile à nos anciens et nouveaux camarades, ce sera pour nous la plus belle récompense.

---

L'accueil bienveillant fait aux trois premières éditions de l'œuvre d'un travailleur, par les personnes qui s'occupent de construction ou d'industrie, nous a engagé à poursuivre la réalisation de la tâche que nous nous étions imposée, laquelle consiste à mettre les règles de l'art de construire à la portée de

tous les hommes appelés à les appliquer, et cela non-seulement d'une manière purement pratique, mais aussi avec toutes les considérations théoriques desquelles ces règles découlent.

Pour atteindre plus sûrement notre but, outre les nombreuses additions faites aux premières éditions de notre recueil de formules, pour lui faire suivre les progrès de toutes les branches de l'industrie, nous avons publié l'*Introduction théorique et pratique de la science de l'ingénieur* (2e édition), renfermant un ensemble bien complet de toutes les règles relatives à l'*Arithmétique*, à la *Géométrie* et à l'*Algèbre*; la *Trigonométrie*, avec une table des expressions trigonométriques naturelles de tous les angles de minute en minute; les *Notions de Géométrie analytique*, contenant les tracés des courbes employées dans les arts, leurs équations analytiques, leurs propriétés et leurs mesures; le *levé des plans*, l'*arpentage* et le *nivellement*, avec la description des instruments, la manière de les régler, et les détails relatifs à leur emploi; enfin, la *Mécanique*, où se trouvent exposés tous les principes de *Statique*, de *Dynamique*, d'*Hydrostatique* et d'*Hydrodynamique*, lesquels mettront les personnes qui n'ont pas fait une étude complète de la science de l'ingénieur, à même de bien comprendre les règles de notre Aide-mémoire et d'en saisir toutes les conséquences.

Nous terminons en témoignant la plus vive reconnaissance aux personnes qui ont bien voulu nous communiquer leurs observations; elles verront, dans le courant de l'ouvrage, l'importance que nous attachons à leurs renseignements par le soin que nous avons apporté à en donner tous les détails.

# TABLE ANALYTIQUE DES MATIÈRES.

## PREMIÈRE PARTIE.

### Des moteurs naturels animés et inanimés.

#### Définitions et principes.


| Numéros. | | Pages. |
|---|---|---|
| 1 | Observations. | 1 |
| 2 | Inertie. | 1 |
| 3 | Force. | 1 |
| 4 | Mouvement uniforme. | 1 |
| 7 | Mouvement varié. | 2 |
| 8 | Mouvement périodique uniforme. | 2 |
| 9 | Vitesse dans le mouvement varié. | 2 |
| 12 | Mouvement uniformément varié. | 3 |
| 17 | Poids d'un corps. | 5 |
| 18 | Application des formules du mouvement uniformément varié au cas de la pesanteur. | 5 |
| 20 | Masse d'un corps. | 7 |
| 21 | Relations entre les forces, les vitesses et les masses. Relations entre le poids et la masse d'un corps. | 7 |
| 25 | Impulsion d'une force. | 9 |
| 26 | Quantité de mouvement. | 9 |
| 27 | Égalité entre l'impulsion et la quantité de mouvement. | 10 |
| 28 | Travail produit par une force. | 11 |
| 29 | Force vive. | 11 |
| 30 | Principe général des forces vives. Autres expressions du travail produit par une force. | 11 |
| 33 | Différentes unités de travail : *kilogrammètre*, *grande unité dynamique*, *cheval-vapeur*. | 13 |
| 37 | Tableau des quantités de travail moyennes et journalières produites par les moteurs animés dans diverses circonstances. | 14 |
| 38 | Effort, vitesse et durée du travail journalier des moteurs animés, correspondant au maximum d'effet. | 16 |
| 40 | Tableau du rapport de l'effort de tirage à la charge traînée, voiture comprise, sur différentes espèces de chemins. | 17 |
| 44 | Tableau des rapports de la force de tirage à la charge totale traînée, d'après les expériences de M. Morin. | 18 |

Numéros. Pages.

42 Tableau des efforts qu'un manœuvre de force ordinaire peut exercer pendant un court intervalle de temps, en agissant sur différents outils. . . . . 20

**Pesanteurs spécifiques.**

43 Densité ou pesanteur spécifique, ou encore poids spécifique, d'un corps. . . 20
45 Tableaux des densités de quelques corps, et du poids du mètre cube de quelques autres. . . . . 21

**Machines en général.**

47 Machine. . . . . 29
48 Des trois classes de forces qui agissent sur une machine. . . . . 29
49 Équilibre dynamique d'une machine. . . . . 30
50 Impossibilité du mouvement perpétuel. . . . . 30
51 Détermination de la puissance d'une machine. Établissement d'une machine d'une puissance déterminée. . . . . 31

**Frottement.**

58 Frottement de glissement et frottement de roulement. . . . . 34
61 Tableaux des valeurs du coefficient de frottement : 1° des surfaces planes, d'après les expériences de M. Morin ; 2° des mêmes surfaces, d'après divers opérateurs ; 3° des axes en mouvement sur leurs coussinets. . . . . 37
64 Expressions du travail absorbé par le frottement : 1° d'un corps qui se meut sur une surface plane, pour un espace parcouru déterminé ; 2° d'un axe qui tourne dans un coussinet, pour une révolution ; 3° d'un pivot vertical tournant sur sa crapaudine, aussi pour une révolution ; 4° d'une couronne ou collet tournant en frottant par une face normale à son axe. . . 41
65 Frottement produit par la garniture d'un piston, et travail absorbé par ce frottement pour une course du piston (196 et 214). . . . . 42

**Cordes et courroies.**

66 Roideur des cordes. . . . . 42
68 Équilibre dynamique de la poulie et de la mouffle ou palan. . . . . 46
70 Frottement d'une corde ou d'une courroie sur un cylindre fixe. . . . . 49
71 Transmission de mouvement au moyen d'une corde ou d'une courroie sans fin. Rouleau de tension, largeur des courroies. . . . . 50

**Machines simples.**

74 Levier. . . . . 56
75 Équilibre dynamique du plan incliné, de la presse à coin, de la presse à vis à filets carrés, du treuil et du cabestan. . . . . 57
82 Frottement des engrenages droits, des engrenages coniques et de la crémaillère. . . . . 62
85 Forme des dents de roues d'engrenage. . . . . 63
86 Travail absorbé par le frottment du bouton d'une manivelle. . . . . 64
87 Manivelles à double et à simple effet. Équilibre dynamique de ces manivelles. 64
92 Longueur à donner à une bielle. . . . . 66
93 Volant pour une manivelle à simple effet, et à double effet. Application. . . 67
94 Volant pour une manivelle à simple effet et à contre-poids. . . . . 68

Numéros. Pages.

95 Équilibre dynamique de l'excentrique. . . . . 69
96 Équilibre dynamique du pilon. . . . . 69
97 Choc des corps. . . . . 70
100 Corps exécutant un mouvement de rotation autour d'un axe fixe. Sa force vive. . . . . 73
102 à 115 Rayons de gyration. . . . . 73
116 Marteaux. Leur équilibre dynamique. Proportion des différentes espèces de marteaux. . . . . 79
118 Marteau-pilon. . . . . 82
119 Volants pour marteaux. . . . . 83
120 Formule donnée par M. Morin pour calculer les poids des volants de laminoirs pour les grandes tôles et pour l'étirage des fers en barres. . . . . 85
121 Forces centripète et centrifuge. . . . . 85
122 Pendule simple. Longueur du pendule simple qui bat les secondes à Paris. . 86
123 Pendule conique. . . . . 87
124 Treuil régulateur. . . . . 89
125 Sonnettes à tirandes et à déclic. Battage des pieux. . . . . 90
128 Manége. Chevaux de manége, soins à leur donner (508). . . . . 92
130 Frein dynamométrique. Application. . . . . 94

## Écoulement de l'eau.

131 Régime permanent. Hypothèse du parallélisme des tranches. Écoulement en mince paroi. Vitesse théorique d'écoulement. . . . . 96
134 Tableau des hauteurs correspondant à différentes vitesses d'écoulement. . . 98
135 Écoulement à gueule-bée. Vitesse d'écoulement de l'eau . . . . . 100
136 Vitesse d'écoulement de l'eau par un orifice noyé sur les deux faces. . . . . 100
137 Vitesse d'écoulement d'un liquide soumis à une pression étrangère. . . . . 100
138 Dépenses théorique et effective par un orifice d'écoulement. . . . . 100
140 Contraction complète de la veine. Tableau des coefficients de la dépense. . . 101
141 Contraction incomplète. . . . . 103
142 Orifice prolongé à l'intérieur du vase par un tuyau. . . . . 104
143 Influence de la largeur de l'orifice sur la dépense. . . . . 104
144 Vannes d'écluses. Orifices voisins. Vannes inclinées. . . . . 104
147 Orifices en déversoir. . . . . 105
152 Orifices circulaires garnis d'ajutages cylindriques de même diamètre, d'ajutages coniques convergents, d'ajutages coniques divergents. . . . . 106
155 Orifices accompagnés d'un coursier. . . . . 108
156 Orifices garnis d'ajutages directeurs. . . . . 109
157 Vanne accompagnée d'une buse pyramidale, dite *bec-de-cane*. . . . . 109
158 Écoulement de l'eau lorsque le niveau est variable sur une face ou sur les deux faces de l'orifice d'écoulement. . . . . 109

## Cours d'eau.

160 Jaugeage d'un cours d'eau à section constante et à pente uniforme. Formules de Prony, d'Eytelwein et de M. de Saint-Venant, reliant la pente, la section, le périmètre mouillé et la vitesse du cours d'eau. Rayon moyen. . . 113
161 Relations entre la vitesse moyenne, la vitesse maxima à la surface et la vitesse au fond d'un cours d'eau. Rapport de la vitesse moyenne de tous les filets rencontrés par une verticale à la vitesse à la partie supérieure de la verticale. Tableau des vitesses maximum au fond d'un cours d'eau pour différentes natures de sols. . . . . 116
162 Jaugeage des rivières. . . . . 118

Numéros. Pages.

164 Considérations sur le mouvement uniforme des eaux courantes. . . . . 120

**Tuyaux de conduite des eaux.**

165 Formules de Prony et de M. de Saint-Venant, reliant la pente et le diamètre des tuyaux de conduite, à la vitesse moyenne de régime des eaux. . . . . 125
Tables de Prony, d'Eytelwein, et de M. de Saint-Venant, relatives à l'établissement des canaux à ciel découvert, et tables de Prony et de M. de Saint-Venant, relatives aux tuyaux de conduite des eaux. . . . . 128
166 Application de la table précédente de Prony. . . . . 134
167 Table donnant directement la vitesse de l'eau dans un tuyau de diamètre donné, et le débit de ce tuyau sous une charge déterminée. . . . . 135
168 Résolution des divers problèmes relatifs à l'établissement des tuyaux de conduite des eaux. . . . . 155
174 Pouce de fontainier ou pouce d'eau, ligne d'eau et point d'eau. . . . . 159
175 Borne-fontaine. . . . . 159
176 Perte de charge due aux coudes des tuyaux. . . . . 160
177 Proportions et prix des tuyaux de conduite des eaux. . . . . 160
179 Tuyaux en plomb (pages 165 et 464, tuyaux Chameroy). . . . . 165
180 Service des eaux dans les villes (514). . . . . 167

**Moteurs hydrauliques.**

181 Chute disponible. Niveau des eaux. . . . . 170
183 Roues à aubes planes recevant l'eau en dessous, ou roues à choc. . . . . 170
184 Roues à aubes courbes recevant l'eau en dessous, dites roues à la Poncelet. . 173
185 Roues de côté. . . . . 180
186 Roues de M. Mary. . . . . 185
187 Roues à augets. . . . . 186
188 Roues se mouvant dans un courant à grande section, dites roues pendantes. 195
189 Turbine de M. Burdin. . . . . 196
190 Turbine de M. Fourneyron. . . . . 200
191 Turbine de M. Fontaine-Baron. . . . . 209
192 Turbine-Jonval, perfectionnée par MM. A. Kœchlin et C^e^. . . . . 212
193 Turbines de M. Krafft, de M. Lombard, et de MM. Girard et Callon. . . . . 213

**Machines à élever l'eau.**

194 Machines à colonne d'eau. . . . . 215
195 Bélier hydraulique. . . . . 217
196 Pompes. Différentes espèces de pompes. Leur établissement. . . . . 219
197 Presse hydraulique. . . . . 225
198 Chapelet incliné. Chapelet vertical. Noria. . . . . 226
201 Roues élévatoires. Roues à seaux ou à godets. Tympan. . . . . 229
204 Baquetage à bras. Seau à bascule. Seau manœuvré à l'aide d'un treuil. Écopes. 232
207 Manége du maraîcher. . . . . 233
208 Vis d'Archimède. . . . . 233

**Moulins à vent.**

209 Moulins à vent. Tableau des pressions exercées par le vent à différentes vitesses contre un mètre carré d'une surface choquée directement. . . . . 234
210 Travail des moulins à vent. Travail des moulins à blé ordinaires. . . . . 238

## Mouvement des gaz.


Numéros. Pages.

212 Écoulement des gaz.. . . . . 243
213 Conduites d'air. . . . . 245
214 Machines soufflantes. . . . . 247
215 Ventilateur aspirant. Ventilateur soufflant. . . . . 250


## Résistance des matériaux.


216 Résistance à la traction. Résistance au cisaillement. . . . . 251
217 Résistance des vis à bois. . . . . 260
218 Résistance à l'écrasement. . . . . 260
219 Section d'une bielle. . . . . 270
220 Résistance à un effort transversal, d'une pièce prismatique encastrée par une de ses extrémités et sollicitée à l'autre par une force unique. . . . . 271
Influence de la section transversale de la pièce (568).. . . . . 272
221 Pièce reposant par un des points de sa longueur, et sollicitée à ses extrémités par deux forces qui se font équilibre autour de ce point. . . . . 279
222 Pièce prismatique encastrée par une de ses extrémités, et chargée uniformément sur toute sa longueur. . . . . 280
223 Cas où la pièce encastrée par une de ses extrémités est chargée d'un poids à son autre extrémité et d'une charge uniformément répartie sur toute sa longueur. . . . . 281
224 Pièce reposant sur deux appuis placés à ses extrémités, et chargée d'un poids au milieu de sa longueur. . . . . 281
225 Cas où la pièce reposant sur deux appuis est chargée uniformément sur toute sa longueur (566, 568 et 645). . . . . 282
226 Pièce reposant sur deux appuis, chargée d'un poids au milieu de sa longueur, et d'un autre poids réparti uniformément sur toute sa longueur. . 282
227 Pièce reposant sur deux appuis, et chargée d'un poids placé en un point quelconque de sa longueur. . . . . 283
Cas où la pièce, outre un poids appliqué en un point quelconque de sa longueur, est chargée d'un poids uniformément réparti sur toute sa longueur. 283
228 Pièce prismatique dont une extrémité est encastrée, tandis que l'autre repose librement sur un appui. . . . . 284
229 Pièce prismatique encastrée par ses deux extrémités. . . . . 285
230 Résultats pratiques . . . . . 288
231 Formules pratiques donnant le diamètr. des tourillons.. . . . . 289
232 Solides d'égale résistance (645). . . . . 290
233 Pièce sollicitée par une force appliquée en un point quelconque de sa longueur et faisant avec sa direction un angle $\alpha$. . . . . 291
234 Aiguille verticale supportant une charge d'eau (671). . . . . 292
235 Rupture par glissement longitudinal d'une pièce soumise à la flexion . . . . 294
236 Résistance à la torsion. . . . . 297
Formules pratiques servant à déterminer les dimensions à donner aux pièces cylindriques soumises à un effort de torsion. . . . . 299
237 Arbre soumis à la fois à un effort de flexion et de torsion. . . . . 301
238 Dimensions des balanciers. . . . . 301
239 Dimensions des manivelles. . . . . 302
240 Dimensions des roues d'engrenage. . . . . 303
243 Boulons et écrous. Vis à bois. . . . . 304
245 Classification des fils de fer. Tôles. Fer-blanc. Classification des fers. (Plomb, cuivre, zinc, nos 585 à 588). . . . . 306

## DEUXIÈME PARTIE.

### Chaleur appliquée aux arts industriels.

—

#### Pouvoirs des corps pour la chaleur.


| Numéros. | | Pages. |
|---|---|---|
| 249 | Pouvoir émissif ou rayonnant. . . . . | 309 |
| 250 | Pouvoirs absorbant et réflecteur. . . . . | 310 |
| 251 | Pouvoir conducteur des corps pour la chaleur (305 et 331). . . . . | 312 |


#### Évaluation des températures.


| | | |
|---|---|---|
| 252 | Thermomètres à air et à mercure. Pyromètres à air et de Wedgwood. . . . | 313 |
| 257 | Tableau des températures de fusion de quelques corps. . . . . | 328 |
| 258 | Tableau des températures correspondant à différentes nuances lumineuses. . | 329 |


#### Dilatation.


| | | |
|---|---|---|
| 259 | Dilatation des solides par la chaleur. . . . . | 329 |
| | Dilatation superficielle et dilatation cubique. . . . . | 331 |
| 260 | Dilatation des liquides et des gaz par la chaleur. . . . . | 331 |
| 262 | Influence de la température sur le volume des gaz. . . . . | 334 |
| 263 | Compressibilité des gaz. Compressibilité des liquides et des solides. . . . | 334 |


#### Chaleur spécifique.


| | | |
|---|---|---|
| 265 | Unité de chaleur. Chaleur spécifique. . . . . | 338 |


#### Chaleur latente.


| | | |
|---|---|---|
| 268 | Chaleur latente de liquidité. Chaleur latente de vaporisation. . . . . | 344 |
| 270 | Tableau des températures d'ébullition de quelques matières. . . . . | 346 |


#### Vapeurs.


| | | |
|---|---|---|
| 271 | Propriétés de la vapeur. . . . . | 347 |
| 272 | Relation entre la température et la force élastique de la vapeur d'eau. . . . | 347 |
| 273 | Relation entre la densité de la vapeur d'eau et celle de l'air. . . . . | 352 |
| 274 | Mélange des gaz et des vapeurs. . . . . | 352 |
| 275 | Tableau du poids de vapeur contenu dans un mètre cube d'air saturé à différentes températures, sous la pression atmosphérique $0^m,76$. . . . . | 353 |
| 276 | Influence des matières dissoutes dans un liquide à vaporiser. . . . . | 353 |
| 277 | Tension des vapeurs autres que la vapeur d'eau. . . . . | 354 |


#### Sources de froid.


| | | |
|---|---|---|
| 278 | Tableau du froid produit par quelques mélanges frigorifiques. . . . . | 355 |
| 279 | Tableau des abaissements de température obtenus par M. Gay-Lussac, en faisant arriver un courant d'air desséché au chlorure de calcium sur un thermomètre dont la boule était recouverte d'une batiste humide. . . . . | 35 |

### Liquéfaction et solidification des gaz.

Numéros. Pages.
284 Liquéfaction et solidification des gaz. . . . . 356

### Puissances calorifiques des combustibles.

282 Puissance calorifique d'un combustible. Tableaux des puissances calorifiques de quelques matières combustibles. . . . . 358

### Combustibles.

283 Combustibles, bois, charbon de bois. . . . . 360
286 Tannee, tourbe, charbon de tourbe. . . . . 367
289 Lignite, houille, anthracite, coke. . . . . 368

### Air nécessaire à la combustion.

291 Quantité d'air nécessaire à la combustion. . . . . 374
292 Volume de gaz qui passe par la cheminée d'un foyer. . . . . 375

### Cheminées.

293 Mouvement de l'air chaud dans un tuyau vertical. . . . . 376
294 Maximum de tirage des cheminées. . . . . 380
295 Dimensions des cheminées et des carneaux. Application. . . . . 381
296 Cheminées communes à plusieurs foyers. . . . . 384
297 Température de l'air sortant du foyer, et perte de chaleur due à la température de l'air dans la cheminée. . . . . 384
298 Construction des cheminées. . . . . 385
299 Tirage produit par un ventilateur. . . . . 386
300 Tirage produit par un jet de vapeur (474). . . . . 386

### Foyers.

301 Dimensions des différentes parties d'un foyer. . . . . 387
302 Foyers fumivores. . . . . 388
303 Combustion des gaz sortant d'un haut-fourneau. . . . . 391

### Chaudières à vapeur.

304 Description d'une chaudière à vapeur munie de tous ses accessoires. . . . . 392
305 Transmission de la chaleur à travers les plaques métalliques (331). . . . . 393
306 Métaux employés à la fabrication des chaudières à vapeur. . . . . 394
307 Surface de chauffe des chaudières à vapeur. . . . . 395
308 Vapeur produite par un kilogramme de combustible. . . . . 400
309 Chaudières placées sur des fours à puddler, à réchauffer et à affiner. . . . 400
310 Chaudières chauffées par les gaz des hauts-fourneaux. . . . . 401
311 Epaisseur théorique des chaudières à vapeur. . . . . 402
312 Ordonnances des 22 et 23 mai 1843 relatives aux apareils à vapeur. . . . . 402
313 Épaisseur pratique à donner aux chaudières à vapeur. . . . . 403
314 Épreuves des chaudières à vapeur (400). . . . . 404
315 Autorisation pour l'établissement des machines et chaudières à vapeur. . . . 405

Numéros. Pages.
316 Soupapes de sûreté. Manomètres. . . . . 406
318 Alimentation des chaudières à vapeur. Indicateurs du niveau de l'eau dans les chaudières. . . . . 412
319 Division des chaudières à vapeur en quatre catégories. Emplacement des chaudières à vapeur. . . . . 413
320 Machines à vapeur employées dans l'intérieur des mines. . . . . 415

### Distillation.

321 But de la distillation. Applications. Condensation des vapeurs. . . . . 416

### Évaporation.

323 Évaporation spontanée à l'air libre. . . . . 418
324 Évaporation par courant d'air forcé. . . . . 418
325 Évaporation à l'air libre et à l'aide d'un foyer. . . . . 419
326 Évaporation des liquides chauffés par la vapeur. . . . . 421

### Séchage.

327 Séchage à l'air libre. . . . . 422
328 Séchage produit par un courant d'air chauffé préalablement. . . . . 422
329 Séchage par l'air froid préalablement desséché. . . . . 424
330 Séchage des étoffes par le contact des surfaces métalliques. . . . . 424

### Chauffage.

331 Résultats obtenus par M. Péclet : 1° Perte de chaleur due au rayonnement ; 2° perte due au contact de l'air ; 3° perte totale ; 4° transmission de la chaleur à travers les corps (305) ; 5° transmission de la chaleur à travers les murailles ; 6° transmission de la chaleur à travers les vitres ; 7° chaleur perdue par le sol ; 8° chaleur perdue par les couvertures ; 9° transmission de la chaleur à travers des enveloppes cylindriques. . . . . 425
332 Chauffage des appartements par les cheminées ordinaires. . . . . 431
333 Chauffage par des poêles. . . . . 432
334 Calorifères à air chaud. . . . . 433
335 Chauffage de l'air par la vapeur. . . . . 435
336 Calorifères à eau chaude à basse pression. . . . . 437
337 Calorifères à eau chaude à haute pression. . . . . 438
338 Chauffage des liquides. Chauffage des bains (505). . . . . 439
339 Chauffage des corps solides. . . . . 440

### Ventilation.

340 Air vicié par la respiration, la transpiration et l'éclairage. . . . . 440
343 Chaleur produite par la respiration. . . . . 441

### Exemples d'édifices chauffés et ventilés.

344 Chauffage et ventilation : 1° de la prison cellulaire Mazas et de celle de Provins ; 2° de l'église Saint-Roch ; 3° du grand amphithéâtre du conservatoire des arts et métiers ; 4° de la salle des séances de l'Institut ; 5° de l'hôpital de Lariboisière ; 6 des ateliers de cristallerie de Baccarat. . . . 447

### Éclairage.

Numéros. Pages.
350 Propriétés physiques de la lumière. . . . . 453
351 Matières employées à l'éclairage. . . . . 453
352 Éclairage au gaz. . . . . 454

### Établissement des manufactures dites insalubres.

353 Décret du 15 octobre 1810 et ordonnance du roi du 14 janvier 1815. . . . . 466

---

## TROISIÈME PARTIE.

### Machines à vapeur.

—

354 Dénomination des machines à vapeur. . . . . 471
355 Travail théorique produit par un kilogramme de vapeur d'eau quand on ne fait pas usage de la détente, et quand on emploie la détente. . . . . 472

### Machines à vapeur sans détente ni condensation.

357 Effet d'une machine à vapeur sans détente ni condensation. . . . . 475
358 Calcul des dimensions d'une machine. . . . . 476
359 Travail absorbé par l'alimentation d'une chaudière. . . . . 478
360 Volant. . . . . 478

### Machines à vapeur à condensation sans détente.

361 Description d'une machine. . . . . 478
362 Effet d'une machine à vapeur à condensation sans détente. . . . . 480
363 Calcul des dimensions d'une machine. . . . . 481
364 Quantité d'eau nécessaire à la condensation de la vapeur. Capacité du condenseur et de la pompe à air. Pompe de puits. . . . . 483
365 Volant. . . . . 485
366 Proportions du cylindre à vapeur, d'après l'*Artizan Club*. . . . . 485

### Machines à vapeur à détente sans condensation.

367 Effet d'une machine à vapeur à détente sans condensation. . . . . 487
368 Calcul des dimensions d'une machine. . . . . 488
369 Volant. . . . . 489

### Machines à vapeur à détente et condensation.

370 Machines à deux cylindres, dites machines de Woolf. . . . . 490
371 Effet d'une machine à vapeur à détente et condensation. . . . . 491
372 Calcul des dimensions d'une machine. . . . . 492
373 Volant. . . . . 494

Numéros. Pages.
374 Emploi des vapeurs, autres que la vapeur d'eau, comme force motrice. . . . 495
375 Notions sur le prix des machines à vapeur. . . . . 496
376 Poids des machines à vapeur. . . . . 498
377 Modèle de traité à forfait pour la construction d'une machine à vapeur. . . 500

**Bateaux à vapeur.**

378 Force d'impulsion. . . . . 501
379 Travail moteur absorbé par la marche d'un bateau en une seconde. . . . . 502
380 Impulsion au moyen des roues à palettes. . . . . 503
381 Travail moteur absorbé par seconde pour communiquer la vitesse relative aux palettes. . . . . 503
382 Force de la machine d'un bateau recevant son impulsion au moyen de roues à palettes. . . . . 503
383 Rapport du travail utile au travail perdu. . . . . 504
384 Calcul de la force d'une machine de bateau. . . . . 505
385 Travail moteur nécessaire pour faire remonter ou descendre une rivière par un bateau. . . . . 505
386 Bateau sur un canal. . . . . 506
387 Impulsion au moyen de roues à hélices. . . . . 506
388 Exemples de grands bâtiments à vapeur. . . . . 506
389 Consommation en charbon des machines de bateaux. . . . . 507
390 Vitesse des bateaux à vapeur et des navires. . . . . 507
391 Poids des machines de bateaux. . . . . 507
392 Proportions des bateaux à vapeur et de leurs machines. . . . . 509

**Extrait de l'ordonnance du 23 mai 1843,**

*relative aux bateaux à vapeur qui naviguent sur les fleuves et rivières* (312).

399 Autorisation de navigation. . . . . 52
400 Épreuves des chaudières à vapeur. Épaisseur de ces chaudières (314). . . . 524
401 Soupapes de sûreté. Manomètres. . . . . 525
403 Alimentation des chaudières à vapeur, et indicateurs du niveau de l'eau dans ces chaudières. . . . . 525
404 Emplacement des appareils moteurs. . . . . 526
405 De l'installation des bateaux à vapeur, des agrès, des apparaux et des équipages. . . . . 526
406 Mesures diverses concernant le service des bateaux à vapeur. . . . . 527
407 Conduite du feu et des appareils moteurs. . . . . 528
408 Dispositions relatives aux passagers. . . . . 528

---

## QUATRIÈME PARTIE.

### Chemins de fer.

409 Coup d'œil historique. . . . . 531
410 Division des chemins de fer. . . . . 531

Numéros. Pages.
411 Chemins de fer de service ou de second ordre. . . . . 532

CHEMINS DE FER DE PREMIER ORDRE.

Établissement de la voie.

412 Largeur de la voie. Entre-voie. Accotements. . . . . 533
415 Fossés, sentiers le long des barrières, talus. . . . . 534
416 Ouverture et hauteur des ponts. . . . . 535
417 Pentes des routes aux abords des ponts. . . . . 537
418 Souterrains. . . . . 537
419 Superficies occupées par les gares et ateliers. . . . . 537
420 Chaussée sur déblai, sur remblai, sur un terrain marécageux. . . . . 541
423 Sable et pierres concassées. . . . . 542
424 Dés. Traverses. . . . . 543
426 Coussinets et éclisses. Chevillettes. Coins. . . . . 547
429 Rails. Usure des rails. . . . . 553
431 Fabrication, réception, prix et pose des rails. . . . . 560
435 Plaques tournantes. . . . . 565
436 Plantation de haies de clôture. . . . . 566
437 Fourniture et pose de clôtures en treillage. . . . . 566
438 Chemins de fer à deux ou à une seule voie. . . . . 567

Wagons.

439 Wagons de terrassement. . . . . 568
440 Wagons de service et voitures pour les voyageurs. Poids des voitures et du chargement. Essieux, roues, boîtes à graisse et ressorts. Châssis. Caisses. 570

Résistances au mouvement des wagons.

444 Résistances dues au frottement des essieux et au pourtour des roues. . . . 581
446 Résistance que l'air oppose au mouvement des wagons. . . . . 584
447 Resistance totale à la traction sur un chemin horizontal et en ligne droite. 583
448 Résistance totale à la traction sur un chemin en pente et en ligne droite. . 584
449 Résistances dues aux courbes. . . . . 584
450 Résistance totale qui s'oppose au mouvement d'un wagon sur une courbe en pente. . . . . 586
451 Résultats des expériences faites sur le chemin de Roanne à Andresieux pour déterminer le frottement dû à la force centrifuge. . . . . 586
452 Moyens pour déterminer le frottement total d'un wagon. . . . . 587
453 Expériences pour déterminer le frottement au pourtour des roues. . . . . 590
454 Tableau des résistances totales au mouvement, obtenues en lançant des wagons sur des plans diversement inclinés. . . . . 590
455 Résistance totale que les convois opposent au mouvement. . . . . 590
456 Résistance que les wagons à freins opposent au mouvement du convoi quand les freins sont serrés. . . . . 592
457 Plans automoteurs. . . . . 592
458 Charge que peut traîner un cheval sur un chemin de fer. . . . . 593
459 Machines fixes. . . . . 594
460 Tableau comparatif de la résistance sur différentes voies de communication. 594

Machines locomotives.

461 Classification des machines locomotives. . . . . 594

Numéros. Pages.

462 Pression de la vapeur. . . . . 597
463 Avance et recouvrement. Détente. . . . . 598
464 Adhérence des roues motrices sur les rails. . . . . 599
465 Théorie des machines locomotives. . . . . 600
466 Règle de M. Le Chatelier pour déterminer les dimensions des machines locomotives. . . . . 604
467 Quantités d'eau, de vapeur et de coke consommées dans une machine locomotive (473). . . . . 606
468 Stabilité des machines locomotives. . . . . 607
469 Dimensions des parties principales des machines locomotives. . . . . 608
470 Machines-tenders. . . . . 617
471 Poids des machines locomotives. . . . . 621
472 Prix des machines locomotives, voitures et wagons. . . . . 622
473 Alimentation de la chaudière et du foyer. . . . . 623
474 Pertes de pression produites dans le foyer et dans la boîte à fumée (300). . 625
475 Tableau des dimensions principales de quelques locomobiles. . . . . 626
476 Dispositions relatives à l'emploi des machines à vapeur locomobiles et locomotives (extrait des ordonnances des 22 et 23 mai 1843). . . . . 627

**Frais de construction et d'exploitation des chemins de fer.**

477 Considérations pécuniaires sur l'établissement d'un chemin de fer. . . . . 628
478 Division de la dépense d'exécution d'un chemin de fer. . . . . 628
479 Devis pour la voie et le matériel d'un chemin de fer (prix de l'outillage). . . 629
480 Tableau des prix d'exécution de différents chemins de fer, canaux et routes. Recettes brutes. . . . . 636
481 Différents modes de traiter d'une compagnie de chemin de fer avec les entrepreneurs. . . . . 638
482 Tableau des frais d'entretien annuel, par kilomètre, des chemins de fer, canaux et routes. . . . . 639
483 Prix du transport d'une tonne à un kilomètre, sur chemins de fer et canaux. 640

## CINQUIÈME PARTIE.

### Architecture.

**Ordres d'architecture.**

484 Module. . . . . 641
484 Tableaux des proportions des différentes moulures et membres de moulures qui composent les différents ordres. . . . . 642
485 Corniches des maisons d'habitation. . . . . 647

**Épaisseurs des murs.**

486 Formules empiriques données par Rondelet pour déterminer les épaisseurs des murs. Pans de bois et cloisons. Appuis isolés. . . . . 647
487 Épaisseurs ordinaires des murs (637). . . . . 652
488 Espace occupé par les murs. . . . . 659

### Dimensions des différentes parties d'un édifice


Numéros. Pages.

489 Largeur de la façade d'un édifice. . . . . 653
490 Ordonnance du 1er novembre 1844, concernant la hauteur des bâtiments et de leurs combles dans Paris. Logements insalubres. Conditions de construction. . . . . 653
493 Division de la hauteur d'un bâtiment. Hauteur des étages. . . . . 656
494 Arcades. Frontons. Portes et croisées. Salles. Galeries. . . . . 657
499 Salles à manger et tables, salles de billard, salons, chambres à coucher, etc. 658
500 Cheminées. Escaliers. . . . . 659
502 Fourneaux potagers et fours à cuire le pain. . . . . 660
503 Cours. . . . . 660
504 Composition de diverses maisons d'habitation, tant de ville que rurales, et dimensions de leurs différentes pièces. . . . . 660
505 Bains. Salle de spectacle, Magasins à blé. . . . . 668
508 Écuries. Étables. Bergeries. Porcheries. . . . . 669
512 Laiterie et colombier. . . . . 672
513 Granges. Volume et composition des récoltes. . . . . 672
514 Eau nécessaire dans une ferme (480). . . . . 674


### Matériaux employés dans les constructions.


515 Division géologique des terrains. . . . . 674
516 Division des pierres naturelles en quatre classes. . . . . 676
521 Distinctions usitées entre les pierres de taille. . . . . 682
522 Briques. Leur fabrication. Leur cuisson. . . . . 683
525 Couleurs et indices de bonne qualité des briques. . . . . 688
526 Briques crues. Briques creuses. Poteries. Carreaux en plâtre. . . . . 689
529 Terre employée comme mortier. . . . . 691
530 Plâtre, sa cuisson, son emploi. . . . . 691
531 Chaux, leurs espèces, leurs compositions. . . . . 694
532 Recherches et moyens de se procurer de la chaux hydraulique. . . . . 699
533 Chaux hydrauliques artificielles. . . . . 702
534 Cuisson de la chaux. . . . . 703
535 Extinction de la chaux. Foisonnement de la chaux. . . . . 708
537 Ciment hydraulique ou pouzzolane. . . . . 710
538 Fabrication de la pouzzolane artificielle. . . . . 710
539 Fabrication de pouzzolanes artificielles avec diverses matières. . . . . 713
540 Ciment romain. Emploi de celui de Vassy. . . . . 714
541 Sables, arènes et mortiers. . . . . 723
542 Fabrication du mortier. . . . . 728
544 Eau employée à l'extinction des chaux et à la fabrication des mortiers. . . . 732
545 Béton (561). . . . . 732
546 Mortiers employés à la mer (561, 639 et 658). . . . . 736


### Maçonneries.


547 Divers ouvriers des chantiers de maçonnerie. . . . . 736
548 Différentes espèces de maçonneries. . . . . 737
549 Maçonnerie de pisé. . . . . 737
550 Maçonnerie de pierre de taille. . . . . 739
551 Bossages et vermiculures. . . . . 740
552 Appareil. Taille de la pierre. Outils en usage pour la taille de la pierre. . . 740

Numéros. Pages.
555 Bardage, montage et pose de la pierre. . . . . 744
556 Maçonneries de moellons, de meulière, de briques. . . . . 745
559 Chaînes en pierre de taille, soubassements, et baies de portes et croisées dans les constructions en moellons. . . . . 747
560 Voûtes d'édifices (634). . . . . 748
561 Fondations (639 et 658). . . . . 749
562 Outils d'un compagnon maçon. . . . . 755

**Pans de bois et cloisons.**

563 Pans de bois et cloisons. Noms et dimensions des différentes pièces qui les composent. . . . . 757

**Planchers.**

564 Planchers. . . . . 761
565 Positions que doivent occuper les différentes pièces d'une charpente de plancher par rapport aux âtres des cheminées, etc. . . . . 761
566 Dimensions des pièces de la charpente des planchers. . . . . 762
567 Pose du carrelage ou parquet et du plafond. . . . . 767
568 Planchers en fer. . . . . 768

**Enduits.**

569 Enduits. . . . . 773
570 Rejointoiements. Corniches en plâtre et moulures de lambris. . . . . 774
572 Blanc en bourre. Stucs. . . . . 774

**Combles.**

574 Combles. . . . . 775
575 Fermes. Noms des différentes pièces qui entrent dans la composition d'une ferme. . . . . 776
577 Dimensions des différentes pièces d'une ferme. . . . . 776
578 Calcul des dimensions des pièces de différentes fermes. . . . . 779
579 Charpentes en fer. . . . . 786
580 Poids et inclinaison des toits. . . . . 788
581 Couvertures des édifices. . . . . 789
582 Tuiles. . . . . 789
583 Ardoises. Bardeaux. Plomb. Cuivre. Tôle de fer. Zinc (245). . . . . 793

## SIXIÈME PARTIE.

### Routes. Ponts. Canaux.

—

### Routes.


Numéros. Pages.

589 Division des routes. Composition d'une route. . . . . 799
591 Tableau des dimensions des différentes parties des routes. . . . . 800
592 Pentes de la surface d'une route . . . . . 800
593 Influence de la pente longitudinale des routes sur le tirage des voitures. . . 801
594 Direction d'une route. . . . . 802
595 Considérations générales sur la détermination du point bas d'une chaîne de montagnes. . . . . 802
596 Tracé d'une route. Nivellement. . . . . 804
597 Côtes rouges. Points et lignes de passage. . . . . 810
598 Calculs des déblais et remblais. . . . . 810
601 Rayon des courbes. . . . . 817
602 Évaluation des distances de transport. . . . . 817
604 Exécution des fouilles. . . . . 822
605 Transport des terres avec la brouette, le camion, le tombereau, le bourriquet, les bateaux et par chemins de fer. . . . . 823
606 Construction des chaussées. . . . . 834
610 Cassis. Écharpes. Fossés en gradins. . . . . 838
613 Entretien des routes. Cantonniers. . . . . 839


### Ponts.


615 Diverses espèces de ponts. . . . . 841


### Ponceaux.


616 Ponceaux. Plus grand volume d'eau à débiter. . . . . 842


### Ponts en pierre.


617 Ponts en pierre. Emplacement d'un pont. Débouché. . . . . 845
620 Remou. . . . . 847
621 Grandeur des arches. Leur forme. Leur tracé. . . . . 848
624 Formes des piles. Fondations (561 et 658). . . . . 853
625 Appareil des voûtes. . . . . 854
626 Dimensions des voûtes et de leurs pieds-droits. Joints de rupture. Courbe des pressions. . . . . 855
633 Théorie des voûtes par M. Yvon Villarceau. Étude sur la stabilité des voûtes de M. Carvallo. . . . . 876
634 Construction des voûtes (560). . . . . 883
635 Reconstruction du pont Notre-Dame. . . . . 889
636 Ponts d'Austerlitz, des Invalides et de l'Alma. . . . . 893
637 Murs de soutenement. Murs de revêtement. Batardeaux. Murs en pierre sèche (487). . . . . 895


### Ponts en bois.


643 Ponts en charpente. . . . . 905

### Ponts métalliques.

Numéros. Pages.
644 Ponts en fonte, en fer et en tôle. . . . . 906
645 Planchers de ponts en poutres de fonte et voûtes en briques. . . . . 915

### Ponts suspendus.

646 Ponts suspendus. Calcul des dimensions des différentes parties du système de suspension. . . . . 916
652 Sections des chaînes et des tiges. Formules de M. Endrès, ingénieur des ponts et chaussées. . . . . 921
653 Fabrication des chaînes et des tiges. . . . . 923
654 Piliers. Massifs d'amarrage. Planchers. Garde-corps. . . . . 926
658 Appareils employés pour l'exécution des travaux sous l'eau (546,561 et 639). 930

### Canaux.

659 Division des canaux. . . . . 937

### Canal latéral.

660 Tracé. Section transversale. Alimentation. . . . . 937

### Canaux à point de partage.

663 Tracé. . . . . 939
664 Quantité d'eau à fournir à un canal. Évaporation. Infiltration. Perte due aux portes d'écluses. Perte due au passage des bateaux. Remplissage du canal. 940
670 Construction des sas et des portes d'écluses. . . . . 942
672 Fondations. Épaisseur du radier. . . . . 947

---

## SUPPLÉMENT.

674 Nomenclature des anciennes et des nouvelles mesures. . . . . 949
676 Tables de réduction des anciennes mesures en nouvelles, et réciproquement. 952
677 Table de comparaison des mesures anglaises aux mesures françaises. . . . . 958
678 Conversion des mesures anglaises en mesures françaises. . . . . 960
679 Table de comparaison des mesures russes aux mesures françaises. . . . . 961
680 Évaluations, en mesures françaises, des principales mesures linéaires étrangères à l'usage du commerce. . . . . 962
681 Réduction des principales mesures linéaires étrangères en mesures métriques. 964
682 Table des équivalents chimiques. . . . . 965
683 Table des longueurs des circonférences et des surfaces des cercles ayant pour diamètres des nombres d'unités de 1 à 1000, et des carrés, cubes, racines carrées et racines cubiques de ces nombres. . . . . 971

# TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES.


**Accotements** 534, 799
Adhérence des roues motrices sur les rails 599
Aiguille de M. Vicat 699
Air (chauffage par la vapeur) 435
— (conduites d') 245
— nécessaire à la combustion 374
— nécessaire à la ventilation 440
— nécessaire à un haut fourneau 250
— (résistance au mouvement des wagons) 581.
Ajutages 106
Alimentation des chaudières à vapeur 412, 525
Alimentation d'un canal 939
Amont 803
Anse de panier 849
Anthracite 368
Appareilleurs 740
Appareils pour travailler sous l'eau 930
Aqueduc 842
Arcades 657
Arche 842, 848
Architecture 641
Ardoises 793
Arènes 723
Arrière-bec 853
Assise 739
Ateliers de chemins de fer 537, 633
Augets 767
Autorisation de navigation 523
— pour l'établissement des appareils à vapeur 405
— pour l'établissement des manufactures insalubres 466
Aval 803
Avance et recouvrement 598
Avant-bec 853
**Baies** 747
Bains 668
— (chauffage des) 439
Bajoyers 944
Balanciers (dimensions des) 301
Banc-franc 678
Baquetage à bras 232
Bardage 741
Bardeaux 767, 794
Basalte 682
Bassins 803, 900
Batardeaux 752, 904
Bateaux à vapeur 501
— (dimensions des) 509
— (ordonnances relatives aux) 523
Bateaux (transport des terres en) 833
Bâtiments (hauteur des) 653
— (hauteur des étages des) 656
Becs à gaz 455
Bec-de-cane 109
Bélier hydraulique 217
Bergeries 671
Béton 732, 737, 755, 892
Bief 938
Bielle 66, 270
Binard 741
Bitume 893
Blanc en bourre 774
Blocage 737
Bois 543, 578, 892
Bois de chauffage 360
Boîte à feu 608
Boîtes à graisse 572
Borne-fontaine 459
Bossages 740
Bouilleurs 393
Boulons 304
Bourriquet 826
Boutisse 739
Briques 683, 746
— creuses 690
— réfractaires 689
Brouette 823
**Caillasse** 681
Caisses de voitures de chemin de fer 578
Calorifères 433, 437
Camion 824
Canaux 937
Cantonnier 840

Capacité calorifique 338
Carneaux 381
Carreaux 690
Carrelage 767
Carrés des nombres (table des) 971
Cassis 838
Cercles (table des surfaces des) 971
Chaînes 747
Chaînes de montagnes 802
Chaleur 309
— latente 344
— perdue par un foyer 384
— produite par la respiration 441
— spécifique 338
— (unité de) 338
Chambres à coucher 658
Chapelets 226
Chapelles 220
Charbon de bois 364
Charge d'essai des ponts 908, 913, 921
Charpente 776
Châssis de wagons 577
Chaudières à vapeur 392
— (catégories des) 413
— (emplacement des) 413
— (épaisseur des) 402, 403, 524
— (épreuves des) 404, 524
— (métaux et prix) 394
— (surface de chauffe des) 395
— sur fours à puddler à réchauffer et à affiner 400
— sur hauts fourneaux 401
Chauffage 425
— de l'air par la vapeur 435
— des appartements 431
— des édifices 442
— des liquides 439
— des solides 440
Chaussée 541, 799, 834, 839
Chaux 694
— (cuisson de la) 703
— (extinction de la) 708
— (foisonnement de la) 709
Chaux hydraulique artificielle 702, 892
— (recherches de la) 699
Cheminées 376
— communes à plusieurs foyers 384
— (construction des) 385
— d'appartements 431, 659
— de locomotives 609
— (dimensions des) 381, 400
— (température dans les) 384
— (tirage des) 380
Chemins de fer 531
— à deux ou à une seule voie 567, 636
— (division des) 531
— (frais de construction et d'exploitation des) 628, 636
— (historique des) 531
— (voies des) 533
Cheval-vapeur 13
Chevaux 93, 593, 669
Chevêtres 761
Chevillettes 550
Choc des corps solides 70
Chute des corps 6
— disponible 170
— (hauteur de) 97
Ciment de Vassy 714
— romain 119, 714, 892
Ciments hydrauliques 699, 710, 935
Cintres 883, 890
Circonférences (table des longueurs des) 971
Clef d'une voûte 855, 858
Cliquart 677
Cloche à plongeur 930
Cloisons 757
Clôtures (haies et treillages de) 566.
Coefficient de conductibilité pour la chaleur 312.
Coefficient de contraction ou de la dépense 101
Coefficient de dilatation 329
— de frottement 36, 897, 904, 928
— d'élasticité 252, 272
Coins 59, 552
Coke 373, 606
Col de cygne 184
Colombier 672
Combles 775
Combustibles 360
— (puissance calorifique des) 358
— (vapeur produite par les) 397, 400
Combustion (air nécessaire à la) 374
— des gaz d'un haut fourneau 391
*Commodo et incommodo* (information de) 467
Compressibilité des gaz 334
— des solides et des liquides 337
Compteur à gaz 465
Condensation des vapeurs 417
Condenseur pour le gaz d'éclairage 460
Conductibilité des corps pour la chaleur 312, 393
Conduites d'air 245
— d'eau 125
— de gaz d'éclairage 463
Conflans 679
Contre-forts 899
Contre-poids 608
Cordes (frottement des) 49
— (roideur des) 42

Corniches 647, 774
Cornues 458
Coudes des tuyaux de conduites d'air 247
— — — d'eau 160
Coulis 693
Coulisse Stephenson 599
Courbe des pressions 863, 899, 906
Cours 660
Cours d'eau 113, 118
Coursier 108
Courroies 50, 52
— (frottement des) 49
Coussinets 547
Couvertures 789
Crépi 760
Croisées 657
Cubes des nombres (table des) 971
Cubilot 251, 440
Cuivre 394, 795
Culées 842
**Déblais** 810
Débouché d'un pont 842, 846
Décintrement des voûtes 887
Décret relatif aux établissements et manufactures insalubres 466
Densité 20
Dépense par un orifice d'écoulement 100
Dés 543
Détente de la vapeur 473, 598
Déversoir 105
Diable 741
Dilatation des corps par la chaleur 329
Direction d'une route 802
Distance de transport des déblais 817
Distillation 416
Distribution d'eau 125, 155
— — dans les villes 167
Division géologique des terrains 674
Douelle 854
Dynamomètre 94
**Eaux** dans les villes 167, 900
— (conduites d') 125
— (écoulement de l') 96
— nécessaire dans une ferme 674
— pour alimenter un canal 940
Ébullition (température d') 346
Écharpes 838
Éclairage 453
— (air vicié par l') 441
Éclisses 547
Écluses 938
Écope 232
Écoulement à gueule-bée 100
— de l'eau 96
— des gaz 243
— en mince paroi 97
Écrous 304
Écuries 669
Édifices (chauffage et ventilation des) 442
— (proportions des) 653
Élingue 742
Ellipse (voûtes en) 889, 895
Empierrement (chaussées en) 836
Emplacement des chaudières à vapeur 413, 526
Encaissement 753
— à revêtir 935
Enchevêtrures 761
Enduit 760, 773
Engrenages (dimensions des) 303
— (frottement des) 62
Enrochements 755
Entrevous 767
Épaisseurs des murs 647, 895, 901
Épaufrures 740
Épreuves des chaudières à vapeur 404, 524
Épurateur du gaz d'éclairage 461
Équilibre dynamique d'une machine 30
Équivalents chimiques 965
Escaliers 659
Essai des ponts 908, 913, 921
Essieux 572
Étables 670
Établissement des appareils à vapeur 402
Établissements insalubres 466
Évaporation 418, 940
Extrados 855
**Façade** d'un édifice 653
Fantons 768
Fer-blanc 306
Fermes 776, 890
Fers 307, 550, 560, 578, 893, 921
Fils de fer 306, 921, 924
Flèche 849, 947
Flotteur 413
Fondations 749, 853, 947
Fonte 251, 440, 547, 893
Forces centripète et centrifuge 85
— élastique de la vapeur 347
— (impulsion d'une) 9
— mouvante ou motrice 29
— résistante 29
— (travail d'une) 11
— vive 11, 73
Formules chimiques 965
Fossés 534, 799, 839
Fouille des terres 822
Four à cuire le pain 660
Fourneaux de chaudières à vapeur 392
— potagers 660
Fours à puddler, à réchauffer et à affiner 400, 440
Foyers (dimensions des) 387, 608
— fumivores 388
Frais d'entretien des chemins de fer, canaux et routes 639
Frein dynamométrique 94
Freins de wagons 592
Froid (sources de) 355
Frontons 657
Frottement 34, 592
— (coefficient de) 35
— des engrenages 62
— des essieux 581
— d'une corde ou d'une courroie 49
Fusion (température de) 328

**Gâchage** du plâtre 693
Garde-corps 930
Gares 537, 636
Gaz (compressibilité des) 334
— (compteur à) 465
— (conduites de) 245
— (dilatation des) 334
— (éclairage par le) 454
— (écoulement des) 243
— (liquéfaction et solidification des) 356
Gaz d'un haut-fourneau (combustion des) 391, 401
Gazomètre 462
Gobetage 760
Granges 672
Granit 681, 891
Gravité 5
Grès 679
Grilles 387, 400, 608
Gypse 691

**Haies** de clôture 566
Hauteur des bâtiments dans Paris 653
— des étages 656
Haut-fourneau 250, 391, 401, 440
Houille 368, 459, 607
Hourdis 737

**Impulsion** d'une force 9
Indicateurs du niveau de l'eau 412, 525
Inertie 1
Infiltration 940
Informations de *commodo* et *incommodo* 406, 467
Intrados 855

**Jaugeage** d'un cours d'eau 118
Joints 739

**Kilogrammètre** 13

**Laiteries** 672
Lambourdes 679, 768
Lanterne 221
Laves 681
Laveur pour le gaz d'éclairage 461
Levier 56
Liais 676
Libages 739
Ligne d'eau 159
Lignite 368
Limosinage 737
Linçoirs 761
Liquéfaction des gaz 356
Lits 739
Loch 507
Locomobiles 627, 732
Locomotives (alimentation des) 623
— (classification des) 594
— (consommation des) 606
— (dimensions des) 608
— Engerth 617
— (ordonnances relatives aux) 627
— (poids des) 621
— (prix des) 622
— (puissance des) 604
Locomotives (règle pour déterminer les dimensions des) 604
— (stabilité des) 607
— tenders 617
— (théorie des) 600
Louve 742
Lumière (propriétés physiques de la) 453
Lumineuses (nuances) 329

**Macadam** 836
Machines 29
— à colonne d'eau 215
— à élever l'eau 215
— (équilibre dynamique d'une) 30
— (rendement d'une) 34
— soufflantes 247
Machines à vapeur 471
— à condensation sans détente 478
— à détente et condensation 490
— à détente sans condensation 487
— (dénomination des) 471
— sans détente ni condensation 475
— (établissement des) 402
— (modèle de traité pour la construction des) 500
— (poids des) 498, 507
— (prix des) 496
— (employées dans l'intérieur des mines) 415
Machines à vapeurs autres que celle d'eau 495
Machines locomotives 594
Maçonneries 736, 739, 745, 746
Maçons 736, 755
Magasins à blé 669
Maisons d'habitation (composition des) 66
Manége 92
— du maraîcher 233
Manivelles (dimensions des) 302
— (équilibre des) 64
Manomètres 408, 525
Manufactures insalubres 466
Marteaux 80
Marteau-pilon 82
Masse 7
Matériaux de construction 674
Mélange des gaz et des vapeurs 352
Mélanges frigorifiques 355
Mesures anciennes 949
— étrangères 958
— nouvelles 950
Meulière 680, 746, 892
Modes de traiter d'une compagnie avec les entrepreneurs 638
Module 641
Moellons 745, 891
Moment d'élasticité 272
Moment d'inertie 73, 271
— polaire 297
Moment d'une force 56, 61
Montagnes (chaînes de) 802
Montée d'une voûte 849
Mortier de terre 691
Mortiers 723, 892

Mortiers à la mer 736, 935
Moteurs animés 14
— hydrauliques 170
Mouffle 48
Moulins 238
Moulins à vent 234
Moulures 645, 774
Mouture 241
Mouvement accéléré 3
— périodique 2
— perpétuel 30
— (quantité de) 9
— retardé 3
— uniforme 1
— varié 2, 3, 4
Mouvements de lacet, de galop, de roulis, et de recul ou de tangage 608
Mur de défense 414
Murs d'éperon 184
— de revêtement 901
— de soutenement 895
— de tampanne 184
— en pierres sèches 904
— (épaisseurs des) 647
**Naissances** d'une voûte 849
Niveau des eaux 170
Nivellement 804
Nœud 507
Noria 228
**Observations** 1
Ordonnances relatives à la hauteur des bâtiments dans Paris 653
— à la position des pièces de charpente par rapport aux cheminées 761
— aux appareils à vapeur 402, 415
— aux bateaux à vapeur 523
— aux établissements et manufactures insalubres 466
— aux locomobiles et locomotives 627
Ordres d'architecture 641
Outillage d'un atelier de chemin de fer 633
Outils d'un cantonnier 841
— d'un compagnon maçon 755
— pour la taille de la pierre 741
Ouvriers maçons 736
**Palan** 48
Palées 842
Pans de bois 757
Parallélisme des tranches 96
Parement 739
Parmin 679
Parpaing 739
Parquet 767
Pavage 834
Pendule simple 86
— composé 87
Pentes des routes 537, 800
Pesanteur 5
— spécifique 20
Pieds-droits (épaisseur des) 860
Pierre franche 678
Pierres calcaires 676
— concassées 542, 733, 837
Pierres de taille 682, 739, 740, 891
— naturelles 676
— scintillantes 679
Pieux 91, 752
Piles 842, 853
Piliers 926
Pilon 69, 238
Pisé 737
Pistons 42, 223, 610
Plafond 767
Planchers 761
— de ponts 945, 929
Plan incliné 57
Plans automoteurs 592
Plaques tournantes 565
Plate-bande 747
Plâtre (cuisson du) 440
— (sa cuisson, son emploi) 694
Plein cintre 849
Plomb 165, 794
Pluie 843
Poêles 432
Poids 5
— des machines à vapeur 498, 507
— spécifique 20
Point d'eau 159
Pompes 219, 483, 610
— à incendie 225
Ponceaux 842
Ponts 844
— en charpente 905
— en pierre 845
— métalliques 906
— (ouverture et hauteur des) 535
— suspendus 916
Porcheries 671
Porphyre 682
Portes 657
Poteries 690
Pouce d'eau 159
Poulie 46
Poussée des terres et de l'eau 895
Pouvoirs absorbant et réflecteur 310
— conducteurs 312
— émissifs ou rayonnants 309
Pouzzolanes 699, 710
Presse à coin 59
— à vis 60
— hydraulique 225
Pressions absolue et effective de la vapeur 403
Profils 800, 806
Puissances calorifiques des combustibles 358
Pyromètres 323, 327
**Quantité** de mouvement 9
Queue d'une pierre 739
**Racinaux** 754
Racines carrées et cubiques des nombres (table des) 971
Radiers 845, 947
Rails 553
Rappointis 767
Ravalement 740, 744

Rayon de gyration 73
— moyen 113
Rayons des courbes 585, 609, 817
Recettes sur chemins de fer 636
Recouvrement 598
Régime permanent 96
Reins d'une voûte 855
Rejointoiement 744, 774
Remblais 810
Remou 847
Rendement d'une machine 34
Résistance au mouvement des voitures 17
— — des wagons 581, 594
— — des wagons à freins 592
— — sur différentes voies de communication 594
Résistance des matériaux 251
— — à la compression 260, 928
— — à la flexion 271, 292, 301, 763, 765
— — à la torsion 297, 301
— — à la traction 251
— — au glissement longitudinal 294
— — à un effort oblique 291
— — (solides d'égale) 290, 915
Résistance des vis à bois 260
— que l'air oppose au mouvement 234, 581
Résistances utile et nuisible ou passive 29
Respiration 441
Ressorts 572, 610
Riberme 939
Roche 677
Roideur des cordes 42
Roues à seaux ou à godets 229
— élévatoires 229
Roues d'engrenages (dimensions des) 303
— (frottement des) 62
Roues de locomotives 609
— de wagons 572
Roues hydrauliques 170
— à aubes planes ou à choc 170
— à augets 186
— à la Poncelet 173
— de côté 180
— pendantes 195
— turbines 196
Rouleaux de tension 51
Routes 799
**Sable** 542, 723, 892
Salles 658
— de spectacle 669
Salons 658
Sapine 741
Sas 938
Scafendre 932
Seau à bascule 232
— manœuvré par un treuil 233
Séchage 422
Sentiers 534
Sifflet d'alarme 412
Silex 679
Solidification des gaz 356
Solides d'égale résistance 290, 915
Solives 761
Sonnettes 90
Soubassement 747
Soupapes de sûreté 406, 525, 627
Souterrains 537
Sources de froid 355
Stabilité des locomotives 607
Stucs 775
Stuffing-box 220
Surface de chauffe des chaudières à vapeur 395
— — réduite 396
**Taille** de la pierre 740
Talus 534, 895
Talweg 803
Tannée 367
Température d'ébullition 346
— de fusion 328
— de la vapeur 347, 354
— des nuances lumineuses 328
Tension de la vapeur 347
Terrains (division géologique des) 674
Thermomètres 313, 324
Timbres des chaudières à vapeur 403
Tirage des cheminées 380
— par un jet de vapeur 386, 625
— par un ventilateur 386
Tirage des voitures 17, 594, 801
Tiroirs 480, 610
Toits 788
Tôles 306, 394, 795
Tombereau 825
Tourbe 367
Tourillons (frottement des) 41
— (résistance des) 289
Tracé d'un canal 939
— d'une route 804
Transpiration 440
Transport des déblais 817, 823
— sur chemins de fer et canaux (frais de) 640
Travail dans une machine 30
— des moteurs animés 14
— d'une force 11
— moteur 30
— nuisible 30
— produit par la vapeur 472
— (unités de) 13
— utile 30
Traverses 543
Treillages pour clôtures 566
Treuil 61

Treuil régulateur 89
Tubes 609
Tuiles 789
Turbines 196
Tuyaux de conduite des eaux 125
— (prix des) 165
— (proportions des) 160
Tympan 230, 853
**Unité** de chaleur 338
— de force 8
— de masse 8
— pour mesurer la vitesse des bâtiments en mer 507
Unités anciennes 949
— étrangères 958
— de travail 13
— nouvelles 950
— pour mesurer l'eau 159
**Vapeur** 347, 418, 422
— (chauffage de l'air par la) 435
— (condensation de la) 417
— contenue dans l'air 353
— (densité de la) 348, 352
— (évaporation des liquides chauffés par la) 424
— (force élastique de la) 347
— produite par les combustibles 397. 400, 421
— produite par une surface de chauffe 395, 420
— (travail produit par la) 472
Vapeurs autres que la vapeur d'eau 354, 495
Vaporisation (influence des matières dissoutes sur la) 353
Vanne d'écluse 104, 944
Vent (pression et vitesse du) 234
Ventelles 946
Ventilateurs 250, 386, 451
Ventilation 440, 442
Vergelet 679
Vermiculures 740
Verreries 440
Verrins 887
Viaduc 842
Vis à bois (dimensions des) 306
— (résistance des) 260
Vis d'Archimède 233
— (presse à) 60
Vitesse (accélération de) 3, 5
— angulaire 73
— dans le mouvement uniforme 1
— dans le mouvement varié 2
— d'écoulement des liquides 97
— d'un cours d'eau 116
— des bateaux à vapeur et des navires 507
— des moteurs animés 16
— du vent 235
Voitures de chemin de fer 570, 632
Volant 67
— pour laminoirs 85
— — machines à vapeur 478, 485, 489, 494
— — marteaux 83
Voussoirs 854
Voûtes 748
— ou arches de ponts 849
— (appareil des) 854
— (construction des) 883
— (dimensions des) 855
— en ellipse 889, 895
**Wagons** 568
— (chargement des) 574
— (résistance au mouvement des) 584
— (transport des terres en) 827
**Zinc** 795

FAUTES A CORRIGER.

| Pages. | Lignes. | |
|---|---|---|
| 422 | 23. | *Sous la pression*, mettre : *Sous la même pression*. |
| 646 | 5 en remontant. | *Page* 543, mettre : *page* 645. |

# FORMULES,

## TABLES ET RENSEIGNEMENTS PRATIQUES;

### AIDE-MÉMOIRE

### DES INGÉNIEURS, DES ARCHITECTES, ETC.

---

## PREMIÈRE PARTIE.

### Des moteurs naturels animés et inanimés.

---

#### DÉFINITIONS ET PRINCIPES.

1. *Observations.* Dans ce qui va suivre, à moins qu'on n'exprime le contraire :

Un nombre placé entre parenthèses ( ) indique un numéro d'ordre à consulter ;
Un nombre précédé de *Int.* ou de *Art*, placé entre parenthèses, indique un numéro d'ordre de notre *Introduction à la science de l'ingénieur* (2e édition) ou de notre *Pratique de l'art de construire* à consulter.
Les longueurs sont exprimées en mètres ;
Les surfaces, en mètres carrés ;
Les volumes, en mètres cubes ;
Les temps, en secondes ;
Les vitesses, en mètres parcourus par seconde ;
Les forces, en kilogrammes ;
Les quantités de travail, en kilogrammètres (33) ;
$\pi = 3{,}141\,5926$, ou à peu près 3,1416, ou même 3,14 ; c'est le rapport approché de la circonférence au diamètre (*Int.*, 666) ;
$g = 9{,}8088$ (18).

2. La propriété que possède la matière, de ne pouvoir par elle-même passer de l'état de repos à celui de mouvement, ni modifier le mouvement dont elle est animée, est ce que l'on appelle son *inertie* (*Int.*, 1290).

3. Une *force* est la cause quelconque qui modifie ou tend à modifier l'état de repos ou de mouvement d'un corps (*Int.*, 1291).

4. Le *mouvement* d'un corps est dit *uniforme*, quand les longueurs parcourues en temps égaux quelconques sont égales.

5. Dans le mouvement uniforme, la *vitesse* est l'espace parcouru pen-

dant l'unité de temps, ou qui serait parcouru pendant cette unité si le mouvement était suffisamment prolongé.

De cette définition et de la précédente, il résulte que la vitesse est constante pendant toute la durée du mouvement uniforme.

**6.** Dans le mouvement uniforme, la relation entre l'espace parcouru, la vitesse et le temps est (*Int.*, 1301)

$$E = vt, \quad \text{d'où} \quad v = \frac{E}{t} \quad \text{et} \quad t = \frac{E}{v}.$$

E espace parcouru pendant le temps $t$;
$v$ vitesse (5);
$t$ durée du mouvement.

*Application.* Quel est l'espace parcouru pendant 3′, la vitesse étant de 4 mètres par seconde?

Faisant $v = 4$ et $t = 60 \times 3 = 180$ dans la première des formules précédentes, on a

$$E = 4 \times 180 = 720 \text{ mètres.}$$

La seconde des formules précédentes donne $v$ quand E et $t$ sont connus, et la troisième fournit $t$ quand on connaît E et $v$.

**7.** Le *mouvement* d'un corps est dit *varié* lorsque, contrairement à ce qui existe dans le mouvement uniforme (4), les espaces parcourus en temps égaux quelconques sont inégaux, c'est-à-dire quand la vitesse n'est pas constante pendant toute la durée du mouvement; alors, la relation (6) n'existe plus.

**8.** Le *mouvement* est dit *périodique uniforme*, lorsque le mobile parcourt certains espaces égaux dans des temps égaux, sans que la même condition soit remplie pour les parties de ces espaces.

Un de ces espaces est le chemin parcouru pendant une *période*, et le temps employé à le parcourir est la *durée de la période*.

Prenant la durée d'une période pour unité de temps et le chemin parcouru pendant cette unité de temps pour vitesse $v$, l'espace E, la vitesse $v$, et le temps $t$, qui exprime un nombre entier de durées de périodes, sont liés par les relations du n° 6.

**9.** *Vitesse dans le mouvement varié.* Quoique la vitesse puisse ne pas être la même à deux instants successifs du mouvement, on peut la considérer comme constante pendant une portion quelconque infiniment petite de la durée du mouvement; alors, à l'instant considéré, *la vitesse est égale à l'espace infiniment petit divisé par le temps infiniment petit employé à le parcourir*, ou bien encore, *à l'espace qui serait parcouru pendant l'unité de temps, si, à partir de l'instant considéré, le mobile se mouvait avec une vitesse constante égale à celle qu'il a acquise à cet instant* (5).

Désignant par $dE$ l'espace infiniment petit parcouru, et par $dt$ le temps infiniment petit employé à le parcourir, la vitesse est donc

$$v = \frac{dE}{dt}.$$

Dans la pratique, il est impossible de prendre $dE$ et $dt$ infiniment petits, et par suite d'avoir $v$ exactement; mais la valeur que l'on trouvera pour cette quantité se rapprochera d'autant plus de la vérité, que $dE$ et $dt$ seront pris plus petits.

Traçant une courbe ayant les valeurs de $t$ pour abscisses et celles correspondantes de E pour ordonnées, la valeur de $v$ après un temps $t$ est donnée par la tangente trigonométrique de l'angle que forme avec l'axe des $t$ la tangente menée à la courbe au point correspondant à $t$ (*Int.*, 1305).

**10.** *Variation de la vitesse dans le mouvement varié.* $v$ étant la vitesse du mobile à la fin du temps $t$, après le temps $t$ plus le temps infiniment petit ou *instant* $dt$, elle a augmenté ou diminué d'une quantité infiniment petite $dv$, et elle est devenue $v \pm dv$.

$dv$ étant la variation de la vitesse pendant le temps $dt$, la variation moyenne est, pour l'unité de temps, pendant le temps $dt$,

$$dv \times \frac{1}{dt} = \frac{dv}{dt}.$$

Cette valeur est la quantité dont varierait la vitesse pendant l'unité de temps qui succéderait à $t$, si, pour chaque instant $dt$ de cette unité, l'augmentation de la vitesse était constante et égale à $dv$.

$\frac{dv}{dt}$, que nous représenterons par $j$, s'appelle l'*accélération de vitesse pendant l'unité de temps*, ou simplement l'*accélération de vitesse* à l'instant considéré, c'est-à-dire à l'instant qui succède au temps $t$.

Les tangentes à une courbe ayant les valeurs de $t$ pour abscisses et celles correspondantes de $v$ pour ordonnées fournissent les valeurs de $j$, comme les tangentes à la courbe du n° 9 donnent celles de $v$ (*Int.*, 1306).

**11.** Lorsque la vitesse $v$ et l'accélération $j$ sont de même signe, c'est-à-dire à la fois toutes deux positives ou toutes deux négatives, le *mouvement* est *accéléré*, dans le sens vulgaire de ce mot; si, au contraire, ces deux quantités sont de signes différents, le *mouvement* est *retardé*.

**12.** Lorsque l'accélération $j$ est constante, le *mouvement* est dit *uniformément varié*.

**13.** *Expression de la vitesse dans le mouvement uniformément varié* (*Int.*, 1310). $v_0$ étant la *vitesse initiale*, c'est-à-dire la vitesse du mobile au commencement du temps $t$, après ce temps, le mobile possède une vitesse

$$v = v_0 \pm jt.$$

Considérant une origine sur la ligne que suit le mobile, $v_0$ est positif ou négatif, suivant son sens, et on a, en définitive (*Int.*, 1310),

$$v = \pm v_0 \pm jt.$$

Si le corps part du repos, on a $v_0 = 0$, et, alors, après le temps $t$ la vitesse est

$$v = \pm jt, \quad \text{d'où} \quad j = \pm \frac{v}{t} \quad \text{et} \quad t = \frac{v}{j}.$$

On peut de même tirer les valeurs de $j$ et de $t$ de chacune des deux formules précédentes, et on voit que dans tous les cas *$j$ est égal à la variation de la vitesse pendant le temps $t$, divisée par ce temps.*

**14.** *Expression de l'espace parcouru dans le mouvement uniformément varié* (*Int.*, **1311**).

1° Le mouvement étant uniformément accéléré, on a

$$E = v_0 t + \frac{1}{2} jt^2 :$$

E espace parcouru pendant le temps $t$;
$t$ temps pendant lequel on considère le mouvement;
$v_0$ vitesse initiale;
$j$ accélération de vitesse (10);

2° Quand le mouvement est uniformément retardé, la quantité $\frac{1}{2} jt^2$ est négative, et, après le temps $t$, on a

$$E = v_0 t - \frac{1}{2} jt^2.$$

3° Si au commencement du temps $t$ le mobile avait déjà parcouru l'espace $E_0$, après ce temps $t$ l'espace total parcouru serait

$$E = E_0 + v_0 t + \frac{1}{2} jt^2.$$

4° Dans le cas où la vitesse initiale $v_0 = 0$, la formule 1° devient

$$E = \frac{1}{2} jt^2. \qquad (a)$$

Remplaçant $j$ par sa valeur en fonction de $v$ (13), on a aussi

$$E = \frac{1}{2} vt.$$

5° Pour $t = 1$, la formule $(a)$ devient

$$E = \frac{1}{2} j.$$

Ainsi, *le corps partant du repos, l'espace parcouru pendant la première unité de temps du mouvement est la moitié de la vitesse acquise à la fin de cette unité*, c'est-à-dire *la moitié de l'espace que parcourrait le mobile pendant la deuxième unité de temps du mouvement*, si

*se mouvait d'une manière uniforme avec la vitesse acquise à la fin de la première unité.*

Comme on peut prendre un temps arbitraire pour unité de temps, il en résulte qu'après un temps quelconque, la vitesse acquise, c'est-à-dire l'espace qui serait parcouru d'un mouvement uniforme pendant un temps égal à celui pris pour unité, serait double du chemin qui a été parcouru pendant ce temps.

*Remarque.* Prenant une origine sur la ligne que suit le mobile, la distance à laquelle ce mobile se trouve du point fixe est, dans tous les cas que nous venons d'examiner, représentée par la formule générale

$$E = \pm E_0 \pm v_0 t \pm \frac{1}{2} j t^2. \qquad (Int., 1311.)$$

**15.** L'action continue d'une force constante sur un corps produit un mouvement uniformément varié (*Int.*, 1322). Ainsi, lorsqu'un corps possède un mouvement uniforme, c'est qu'il n'est sollicité par aucune force, ou que les forces qui le sollicitent se font équilibre entre elles (*Int.*, 1323).

**16.** Un corps quelconque, quelles que soient sa nature et la quantité de matière qui le compose, abandonné à lui-même, se meut ou tend à se mouvoir vers le centre de la terre. La cause inconnue qui produit cet effet se nomme *pesanteur* ou *gravité* (*Int.*, 1312).

**17.** *Le poids d'un corps* est la résultante des actions de la pesanteur sur toutes les molécules de ce corps.

L'action de la pesanteur étant la même pour toutes les molécules, le poids d'un corps est donc proportionnel au nombre des molécules ou à la quantité de matière que contient ce corps.

L'action de la pesanteur variant avec la distance au centre de la terre, le poids d'un même corps varie de la même manière. Ainsi un fil qui suspendrait un même corps près de la surface de la terre et dans les régions élevées, serait soumis à une plus grande tension dans le premier cas que dans le second (*Int.*, 1316, 1317).

**18.** *Application des formules du mouvement uniformément varié au cas de la pesanteur.* Le poids d'un corps étant, dans les limites de nos observations, une force à très-peu près constante qui agit d'une manière permanente sur le corps, il en résulte que si ce corps n'est soumis qu'à l'action de la pesanteur, il devra prendre dans le vide un mouvement uniformément accéléré (11). C'est en effet ce que vérifie l'expérience, qui a de plus fait voir que l'accélération de vitesse $j$, qu'on a l'habitude de représenter par $g$ lorsqu'il s'agit de la pesanteur, était, à l'Observatoire de Paris, égale à $9^m,8088$ par seconde. Dans la pratique, on fait souvent, pour abréger les calculs, $g = 9^m,81$.

Lorsque le corps se meut dans l'air, il éprouve, pour déplacer ce gaz, une résistance qui diminue son mouvement. Mais lorsque la vitesse du

corps n'est pas considérable et que sa section est faible par rapport à son poids, on peut supposer, dans les cas ordinaires de la chute des corps, qu'il se meut, sans erreur sensible, dans l'air comme dans le vide.

Les formules du mouvement uniformément varié sont, pour le cas de la pesanteur :

$$1^\circ \qquad v = \pm v_0 \pm gt; \tag{13}$$

$$2^\circ \qquad E = \pm E_0 \pm v_0 t \pm \frac{1}{2} gt^2. \tag{14}$$

Faisant $E_0 = 0$, $v_0 = 0$ et $t = 1''$, cette dernière formule devient

$$E = \frac{1}{2} g = 4^m,9044.$$

Ce qui fait voir que l'espace parcouru pendant la première seconde du mouvement par un corps qui tombe dans le vide, en partant du repos, est égal à $4^m,9044$, moitié de la vitesse acquise après ce temps (*Int.*, 1318).

**19.** *Application de ces formules à la chute des corps.*

La vitesse initiale $v_0$ étant nulle, c'est-à-dire le corps partant du repos, et $t = 5''$ étant la durée de la descente, la vitesse acquise après ce temps est (13)

$$v = gt = 9,8088 \times 5 = 49^m,044. \tag{a}$$

Pour savoir quelle doit être la durée de la chute pour que le mobile acquière une vitesse déterminée $v = 49^m,044$, on remarque que la formule (*a*) donne

$$t = \frac{v}{g} = \frac{49,044}{9,8088} = 5''. \tag{a'}$$

Supposant $E_0 = 0$, $h$ étant l'espace parcouru, c'est-à-dire la hauteur de laquelle le corps est tombé après un temps $t = 5''$, on a (4°, 14)

$$h = \frac{1}{2} gt^2 = \frac{1}{2} \times 9,8088 \times 5^2 = 122^m,61. \tag{b}$$

Pour avoir le temps que mettra un corps pour tomber d'une hauteur $h = 122^m,61$, de la formule (*b*) on tire

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{\frac{2 \times 122,61}{9,8088}} = 5''. \tag{b'}$$

Pour avoir la vitesse qu'acquiert un corps en tombant d'une hauteur donnée $122^m,61$, on remplace dans la formule (*a*) $t$ par sa valeur (*b'*), ce qui donne

$$v = g\sqrt{\frac{2h}{g}} = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9,8088 \times 122,61} = 49^m,044. \tag{c}$$

Pour avoir la hauteur de laquelle doit tomber un corps pour acquérir une vitesse donnée $v = 49^m,044$ par seconde, de la formule $(c)$ on tire

$$h = \frac{v^2}{2g} = \frac{49,044^2}{2 \times 9,8088} = 122^m,61. \qquad (c')$$

Ces formules, qui sont d'un usage continuel en mécanique, donnent : $(a)$ la vitesse en fonction du temps ; $(a')$ le temps en fonction de la vitesse ; $(b)$ la hauteur de chute en fonction du temps ; $(b')$ le temps en fonction de la hauteur de chute ; $(c)$ la vitesse en fonction de la hauteur de chute ; $(c')$ la hauteur de chute en fonction de vitesse.

Ces formules sont données pour le cas de la pesanteur ; mais des formules des n^os^ 13 et 14 on en peut tirer de tout à fait analogues pour un mouvement uniformément varié quelconque. Nous avons préféré, sans double emploi, donner celles dues à la pesanteur, qui sont d'un usage plus fréquent dans la pratique.

20. Le poids P d'un corps (17) divisé par $g$ (18) est la *masse* de ce corps (*Int.*, 1332).

P et $g$ variant dans le même rapport, la masse $\frac{P}{g}$ d'un corps est la même dans tous les lieux. Comme la quantité de matière d'un même corps est aussi constante, quel que soit le lieu qu'il occupe, la masse donne donc une idée exacte de la quantité de matière, et peut lui servir de mesure (22 et 23).

21. *Relations entre les forces, les vitesses et les masses des mobiles sollicités* (*Int.*, 1326 et suivants). On dit que deux *forces* sont *égales*, lorsqu'elles sont capables d'imprimer le même mouvement à un même mobile, et que les *masses* de deux mobiles sont *égales*, lorsque deux forces égales impriment le même mouvement à ces mobiles. De là on conclut :

1° Que, *pour un même mobile, les forces sont proportionnelles aux accélérations de vitesse ;* ainsi on a (*Int.*, 1327)

$$F : f = J : j.$$

F l'une des forces ;
f l'autre force ;
J accélération de vitesse due à la force F ;
j *id.* *id.* f.

Supposant les mobiles partis du repos, $V = Jt$ et $v = jt$ étant les vitesses acquises après le même temps $t$ (13), on a $V : v = J : j$, et, par suite,

$$F : f = V : v.$$

Ce qui fait voir que *les forces sont aussi entre elles comme les vitesses qu'elles communiquent à un même mobile dans le même temps.*

Dans cette même hypothèse, les espaces parcourus étant propor-

tionnels aux accélérations et aux vitesses (14), on a aussi

$$F : f = E : e.$$

2° Que, *pour une même accélération de vitesse* (10), *les forces sont proportionnelles aux masses des mobiles;* ainsi on a (*Int.*, 1335)

$$F : f = M : m.$$

M masse du mobile sollicité par la force F;
*m* masse du mobile sollicité par la force *f*.

3° Que *deux forces quelconques sont entre elles comme les produits des masses* M *et* m *des mobiles qu'elles sollicitent par les accélérations de vitesse qu'elles leur communiquent;* ainsi on a

$$F : f = MJ : mj, \qquad (a)$$

ou encore, à cause de la proportion $V : v = J : j$

$$F : f = MV : mv.$$

Ce qui fait voir que *les forces sont entre elles comme les produits des masses par les vitesses.*

**22.** Appelant *unité de masse*, la masse du mobile qui prend l'unité d'accélération de vitesse dans l'unité de temps quand il est sollicité par l'*unité de force*, il en résulte que faisant dans la proportion précédente (*a*) $f = 1$ et $j = 1$, d'où $m = 1$ et $mj = 1$, on en conclut

$$F = MJ.$$

Ce qui fait voir que *l'intensité d'une force quelconque est représentée par le produit de la masse par l'accélération de vitesse que la force communique au mobile dans l'unité de temps.*

De la formule précédente on tire

$$M = \frac{F}{J} \quad \text{et} \quad J = \frac{F}{M}.$$

Résultats faciles à énoncer verbalement.

**23.** Si la force F est le poids P du corps dont la masse est M, $g = 9^m,8088$ étant l'accélération de vitesse (18), les trois formules précédentes deviennent respectivement

$$P = Mg, \quad M = \frac{P}{g} \quad \text{et} \quad g = \frac{P}{M}.$$

Ces nouvelles formules font voir :

1° *Que le poids d'un corps est égal à la masse multipliée par l'accélération* g *due à sa pesanteur.*

Pour $M = 1$, on a $P = g = 9^k,8088.$

Ce qui fait voir que *le poids d'un corps dont la masse est égale à l'unité est* $9^k,8088$;

2° *Que la masse est égale au poids divisé par* g.

Pour $P = 1$, on a $M = \frac{1}{g} = \frac{1}{9,8088} = 0,102.$

Ce qui montre que *la masse d'un corps du poids de* 1 *kil. est* 0,102 ;

3° *Que l'accélération* g *due à la pesanteur est égale au poids du corps divisé par sa masse.*

**24.** Deux forces étant entre elles comme les accélérations qu'elles communiquent à un même mobile (21), l'une des forces étant le poids du mobile, on a

$$F : P = J : g. \qquad (a)$$

Proportion qui donne l'accélération J qu'une force quelconque communique par seconde à un mobile dont le poids est P et la masse $M = \frac{P}{g}$.

Pour $F = 10^k$, et $P = 25^k$, cette proportion devient

$$10 : 25 = J : 9,8088, \quad \text{d'où} \quad J = \frac{10 \times 9,8088}{25} = 3^m,9235.$$

Comme la vitesse, après un temps quelconque $t$, est $Jt$ (13), ayant l'accélération J, *on peut donc déterminer quelle vitesse une force connue aura communiquée à un mobile d'un poids déterminé après un temps donné.* Pour $t = 8''$, on aura

$$v = 3,9235 \times 8 = 31^m,388.$$

*La proportion* (a) *donne aussi la force* F *qu'il faut appliquer à un mobile du poids* P *pour lui communiquer une vitesse donnée* v *après un certain temps* t.

Pour les données précédentes, on a d'abord

$$J = \frac{v}{t} = \frac{31,388}{8} = 3^m,9235 ;$$

puis la proportion devient

$$F : 25 = 3,9235 : 9,8088, \quad \text{d'où} \quad F = \frac{25 \times 3,9235}{9,8088} = 10^k.$$

**25.** L'*impulsion d'une force* est le produit de son intensité par la durée de son action.

Ainsi, une force de $12^k$ agissant sur un corps pendant $8''$ produit une impulsion représentée par $12 \times 8 = 96$.

**26.** Le produit $mv$ de la masse $m$ d'un corps par la vitesse $v$ qu'il possède prend le nom de *quantité de mouvement.*

Le poids d'un corps étant $50^k$, d'où il résulte que sa masse est (23)

$\frac{1}{g} \times P = 0{,}102 \times 50 = 5{,}10$, et la vitesse qu'il possède étant de 30, sa quantité de mouvement est représentée par

$$mv = 5{,}10 \times 30 = 153.$$

27. *Égalité entre l'impulsion et la quantité de mouvement.*

Lorsque le mouvement est uniformément accéléré, on a (13), en remarquant que l'accélération $j = \frac{F}{m}$ (22),

$$v = v_0 + \frac{F}{m} t,$$

d'où l'on tire

$$Ft = mv - mv_0. \qquad (a)$$

$Ft$ est l'impulsion ; elle a le signe de F.

$mv$ est la quantité de mouvement après le temps $t$, et $mv_0$ est la quantité de mouvement au commencement du temps $t$ ; ces quantités ont respectivement les signes de $v$ et $v_0$.

La formule (*a*) fait voir que l'*impulsion et la différence des quantités de mouvement sont toujours égales et de même signe.* Ce que l'on peut énoncer en disant que l'*impulsion est toujours égale au gain ou à la perte de quantité de mouvement.*

Considérant toujours la vitesse initiale $v_0$ comme positive, il y aura gain de quantité de mouvement lorsque la force F sera positive, c'est-à-dire lorsqu'elle agira dans le sens de $v_0$, et perte lorsqu'elle sera négative (*Int.*, 1341).

Lorsque $v_0 = 0$, c'est-à-dire quand le corps part du repos, la formule (*a*) devient

$$Ft = mv.$$

Ce qui fait voir encore plus simplement que *l'impulsion d'une force est égale à la quantité de mouvement que cette force communique au corps qu'elle sollicite pendant la durée de son impulsion.*

Trois quelconques des quatre quantités F, $t$, $m$, $v$ étant connues, l'équation $Ft = mv$ donne la quatrième.

1er exemple. *Trouver la force* F *capable de réduire au repos en* 5″ *un corps dont le poids est* 50k, *ce corps étant animé d'une vitesse de* 15m *par seconde.*

Substituant ces nombres dans la formule, elle devient

$$F \times 5 = 0{,}102 \times 50 \times 15, \quad \text{d'où} \quad F = \frac{0{,}102 \times 50 \times 15}{5} = 15^k{,}30.$$

2e exemple. *Trouver le temps que mettra une force de* 15k,30 *pour*

*réduire au repos un corps du poids de* $50^k$ *animé d'une vitesse de* $15^m$ *par seconde.*

Ces nombres, substitués dans la formule, donnent

$$15{,}30 \times t = 0{,}102 \times 50 \times 15, \quad \text{d'où} \quad t = \frac{0{,}102 \times 50 \times 15}{15{,}30} = 5''.$$

**28.** *Le travail d'une force se représente par le produit de l'intensité de la force par la projection, sur la direction de la force, de l'espace parcouru par le point d'application.* Ainsi, l'espace parcouru étant rectiligne, on a, en représentant par $\mathcal{T}$ ce travail,

$$\mathcal{T} = F \times E \cos\alpha; \qquad (a)$$

$\mathcal{T}$ travail produit;
F intensité de la force;
E espace parcouru par le point d'application;
$\alpha$ angle que fait la direction de la force avec celle de l'espace parcouru (*Int.* 980).

Quand $\alpha = 0$, c'est-à-dire quand le point d'application se meut dans la direction de la force, on a

$$\cos\alpha = 1, \quad \text{et, par suite,} \quad \mathcal{T} = F \times E.$$

Ainsi, dans ce cas, *le travail est représenté par le produit de la force par l'espace parcouru.*

Intervertissant l'ordre des facteurs dans le second membre de l'équation (*a*), on a

$$\mathcal{T} = E \times F \cos\alpha.$$

Ce qui fait voir que *le travail est aussi représenté par l'espace parcouru* E *multiplié par la projection* $F\cos\alpha$ *de la force sur la direction de cet espace* (*Int.*, 1342 et suivants).

**29.** La moitié $\frac{1}{2}mv^2$ du produit de la masse $m$ d'un corps par le carré $v^2$ de la vitesse qu'il possède prend le nom de *force vive*. Des auteurs l'appellent *puissance vive*, et d'autres nomment *force vive* le produit $mv^2$.

**30.** Dans le mouvement uniformément accéléré, on a (13 et 14), en faisant $j = \frac{F}{m}$ (22),

$$v = v_0 + \frac{F}{m}t, \quad \text{et} \quad E = E_0 + v_0 t + \frac{1}{2}\frac{F}{m}t^2.$$

Éliminant $t$ entre ces deux équations, il vient (*Int.*, 1346).

$$2\frac{F}{m}(E - E_0) = v^2 - v_0^2,$$

d'où l'on tire, en multipliant les deux membres par $\frac{m}{2}$,

$$F(E-E_o)=\frac{1}{2}mv^2-\frac{1}{2}mv_o^2. \qquad (a)$$

$E-E_o$ étant le chemin parcouru pendant l'action de la force F, $F(E-E_o)$ est le travail $\mathcal{T}$ produit par F pendant cette même durée d'action (28).

$\frac{1}{2}mv_o^2$ étant la force vive au commencement de l'action de la force F, et $\frac{1}{2}mv^2$ la force vive à la fin de cette action, comme de plus les quantités $\frac{1}{2}mv_o^2$ et $\frac{1}{2}mv^2$ sont toujours positives, l'équation $(a)$ fait voir que la quantité de travail est toujours algébriquement égale à la différence obtenue en retranchant la force vive avant l'action de la force de la force vive après l'action; ainsi, considérant comme gain de force vive une différence positive, et comme perte une différence négative, on peut énoncer le principe général des forces vives :

*Le travail produit par une force agissant sur un corps est toujours égal au gain ou à la perte de force vive qu'éprouve ce corps pendant l'action de la force.*

L'expression du travail d'une force en fonction des forces vives est d'un usage très-fréquent en mécanique (*Int.*, 1347).

**31.** Dans le cas où $v_o=0$ et $E_o=0$, c'est-à-dire quand le corps part du repos et que les espaces sont comptés à partir du point de départ, la formule précédente $(a)$ devient

$$\mathcal{T}=FE=\frac{1}{2}mv^2.$$

Remplaçant $m$ par $\frac{P}{g}$ (23), on a

$$\mathcal{T}=FE=\frac{Pv^2}{2g},$$

nouvelle expression du travail, dont on fait usage dans les applications.

**32.** Comme $\frac{v^2}{2g}=h$, $h$ étant la hauteur correspondant à la vitesse $v$ (19), on a

$$\mathcal{T}=FE=Ph.$$

*Le travail produit par une force quelconque est donc égal au poids du corps sollicité multiplié par la hauteur correspondant à la vitesse communiquée à ce corps*, c'est-à-dire qu'il est égal au travail qui serait

produit par le poids P descendant de la hauteur $h$, ou à celui qu'il faudrait produire pour élever ce poids à la hauteur $h$.

33. Ainsi le travail produit par une force quelconque peut toujours être ramené à un poids élevé à une certaine hauteur.

Aussi a-t-on adopté pour *unité de travail*, le travail dû au poids de un kilogramme élevé à un mètre de hauteur, et on l'a appelé *kilogrammètre*, que l'on représente par $1^{\text{kilog.m.}}$, ou $1^{\text{k.m.}}$, ou plus simplement encore $1^{\text{km}}$.

F étant exprimé en kilogrammes et E en mètres, le travail est donc (32)

$$T = FE^{\text{km}}.$$

34. Quand F est exprimé en unités de 1000 kilogrammes, le produit FE représente le travail en unités de $1000^{\text{km}}$, que l'on appelle *grandes unités dynamiques*.

35. Le produit $FE^{\text{km}}$ représente un travail indépendant du temps pendant lequel il a été produit; mais l'on conçoit que pour comparer les puissances dynamiques des forces ou des moteurs quelconques, il faut comparer les travaux produits dans un temps donné; ainsi les forces F et F′ produisant respectivement $FE^{\text{km}}$ et $F'E'^{\text{km}}$ en une seconde, il en résulte que les puissances dynamiques des deux forces sont entre elles dans le rapport de FE à F′E′.

36. Afin de pouvoir énoncer la puissance dynamique d'une force, ou comparer les effets dynamiques des différentes forces, sans avoir égard au temps, on a adopté une unité de travail dépendant du temps. Cette unité, que l'on appelle *cheval-vapeur*, équivaut à $75^{\text{km}}$ produits dans une seconde; d'où il résulte que si, pour une seconde, $F'E' = 75^{\text{km}}$, la puissance dynamique de la force F′ sera de un cheval-vapeur, et, pour le même temps, le rapport $\frac{FE}{F'E'} = \frac{FE}{75}$ indiquera la puissance dynamique de la force F en chevaux-vapeur.

Le cheval-vapeur est d'un usage continuel pour évaluer la puissance des machines. Quand on dit qu'une machine est de la puissance dynamique de 10 chevaux, par exemple, ou improprement de la force de 10 chevaux, cela veut dire que le travail dynamique produit par la machine en une seconde équivaut à $75 \times 10 = 750^{\text{km}}$.

Le cheval vivant produit moins de $75^{\text{km}}$ par seconde; ainsi un cheval attelé à une voiture et allant au pas, produit moyennement une traction de 70 kilogrammes avec une vitesse de $0^{\text{m}},90$ par seconde; ce qui fait une puissance dynamique de $63^{\text{km}}$ par seconde ou $\frac{63}{75}$ de cheval-vapeur.

De plus, comme un cheval vivant ne peut travailler que 8 heures sur 24, il en résulte que dans un travail continu un cheval-vapeur remplace plus de trois chevaux.

**37.** *TABLEAU des quantités de travail moyennes et journalières produites par les moteurs animés dans diverses circonstances.*

| NATURE DU TRAVAIL. | POIDS élevé ou effort moyen exercé. | VITESSE par seconde. | TRAVAIL par seconde. | DURÉE du travail journalier. | QUANTITÉ de travail journalière. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1° ÉLÉVATION VERTICALE DES POIDS. | kilog. | mètres. | k.m. | heures. | k.m. |
| Un homme montant une rampe douce ou un escalier, sans fardeau, son travail consistant dans l'élévation du poids de son corps. . . . . | 65 | 0.15 | 9.75 | 8 | 280 800 |
| Un manœuvre élevant des poids avec une corde et une poulie, ce qui l'oblige à faire descendre la corde à vide. . . . . | 18 | 0.20 | 3.6 | 6 | 77 760 |
| Un manœuvre élevant des poids en les soulevant avec la main. | 20 | 0.17 | 3.4 | 6 | 73 440 |
| Un manœuvre élevant des poids en les portant sur son dos au haut d'une rampe douce ou d'un escalier, et revenant à vide. . . . . | 65 | 0.04 | 2.6 | 6 | 56 160 |
| Un manœuvre élevant des matériaux avec une brouette en montant une rampe au 1/12, et revenant à vide. . . . . | 60 | 0.02 | 1.2 | 10 | 43 200 |
| Un manœuvre élevant des terres à la pelle à la hauteur moyenne de 1m,60. . . . . | 2.7 | 0.40 | 1.08 | 10 | 38 880 |
| 2° ACTION SUR LES MACHINES ET OUTILS. | | | | | |
| Un manœuvre agissant sur une roue à chevilles ou à tambour: | | | | | |
| 1° Au niveau de l'axe de la roue; | 60 | 0.15 | 9 | 8 | 259 200 |
| 2° Vers le bas de la roue ou à 24°. | 12 | 0.70 | 8.4 | 8 | 241 920 |
| Un manœuvre marchant et poussant ou tirant horizontalement d'une manière continue. . . . | 12 | 0.60 | 7.2 | 8 | 207 360 |
| Un manœuvre agissant sur une manivelle. . . . . | 8 | 0.75 | 6 | 8 | 172 800 |
| Un manœuvre exercé poussant et tirant alternativement dans le sens vertical. . . . . | 6 | 0.75 | 4.5 | 10 | 162 000 |
| Un cheval attelé à une voiture et allant au pas. . . . . | 70 | 0.90 | 63 | 10 | 2 168 000 |
| Un cheval attelé à une voiture et allant au trot. . . . . | 44 | 2.20 | 96.8 | 4.5 | 1 568 160 |
| Un cheval attelé à un manége et allant au pas. . . . . | 45 | 0.90 | 40.5 | 8 | 1 166 400 |
| Un cheval attelé à un manége et allant au trot. . . . . | 30 | 2.00 | 60 | 4.5 | 972 000 |

| NATURE DU TRAVAIL. | POIDS élevé ou effort moyen exercé. | VITESSE par seconde. | TRAVAIL par seconde. | DURÉE du travail journalier. | QUANTITÉ de travail journalière. |
|---|---|---|---|---|---|
| | kilog. | mètres. | k.m. | heures. | k.m. |
| Un bœuf attelé à un manége et allant au pas. . . . . | 60 | 0.60 | 36 | 8 | 1 036 800 |
| Un mulet attelé à un manége et allant au pas. . . . . | 30 | 0.90 | 27 | 8 | 777 600 |
| Un âne attelé à un manége et allant au pas. . . . . | 14 | 0.80 | 11.2 | 8 | 322 560 |
| 3° TRANSPORT HORIZONTAL DES POIDS. | | | | | |
| Un homme marchant sur un chemin horizontal, sans fardeau, son travail consistant dans le transport du poids de son corps. . . . . | 65 | 1.50 | 97.5 | 10 | 3 510 000 |
| Un manœuvre transportant des matériaux dans une petite charrette ou camion a deux roues, et revenant à vide chercher de nouvelles charges. . . . . | 100 | 0.50 | 50 | 10 | 1 800 000 |
| Un manœuvre transportant des matériaux dans une brouette, et revenant à vide chercher de nouvelles charges. . . . . | 60 | 0.50 | 30 | 10 | 1 080 000 |
| Un homme voyageant en transportant des fardeaux sur son dos. . . . . | 40 | 0.75 | 30 | 7 | 756 000 |
| Un manœuvre transportant des matériaux sur son dos, et revenant à vide chercher de nouvelles charges. . . . . | 65 | 0.50 | 32.5 | 6 | 702 000 |
| Un manœuvre transportant des fardeaux sur une civière, et revenant à vide chercher de nouvelles charges. . . . . | 50 | 0.33 | 16.5 | 10 | 594 000 |
| Un manœuvre employé à jeter de la terre au moyen de la pelle, à 4 mèt. de distance horizontale. | 2.7 | 0.68 | 1.8 | 10 | 64 800 |
| Un cheval transportant des fardeaux sur une charrette, et marchant au pas continuellement chargé. . . . . | 700 | 1.10 | 770 | 10 | 27 720 000 |
| Un cheval attelé à une voiture, et marchant au trot continuellement chargé. . . . . | 350 | 2.20 | 770 | 4.5 | 12 474 000 |
| Un cheval transportant des fardeaux sur une charrette, au pas, et revenant à vide chercher de nouvelles charges. . . | 700 | 0.60 | 420 | 10 | 15 120 000 |
| Un cheval chargé sur le dos et allant au pas. . . . . | 120 | 1.10 | 132 | 10 | 4 752 000 |
| Un cheval chargé sur le dos et allant au trot. . . . . | 80 | 2.20 | 176 | 7 | 4 435 000 |

Les résultats de la troisième partie de ce tableau expriment des effets utiles proprement dits, c'est-à-dire que les poids des machines ou outils qui ont servi au transport ne sont pas compris dans les nombres qui indiquent les charges traînées; de plus, ces résultats snpposent les routes d'une viabilité ordinaire.

38. *Les moteurs animés peuvent faire varier, dans de certaines limites, l'effort produit, la vitesse et la durée du travail journalier*, mais l'expérience prouve qu'un tel moteur fournit le maximum d'effet journalier : 1° quand l'effort qu'il produit varie du 1/3 au 1/5 de celui qu'il pourrait produire, sans vitesse, pendant un temps peu prolongé; 2° quand la vitesse varie du 1/4 au 1/6 pour l'homme, et du 1/12 au 1/15 pour le cheval, de la plus grande vitesse que ces moteurs pourraient prendre, pendant un temps peu prolongé, en ne produisant aucun effort; 3° quand la durée du travail journalier varie de 1/2 au 1/3 du temps le plus prolongé pendant lequel le travail peut être constamment soutenu, sans nuire à la santé de l'homme ou des animaux; ce temps ne peut dépasser dix-huit heures par jour, quelque petite que soit la tâche journalière, ne consisterait-elle qu'en une présence constante sur les ateliers.

39. *Voici quelques résultats que nous extrayons du Traité des moteurs, par* M. Courtois, ingénieur en chef des ponts et chaussées :

Un homme d'une taille médiocre et d'une force ordinaire pèse 70 kilogrammes, y compris ses vêtements.

Le plus grand effort qu'il puisse exercer en tirant ou poussant horizontalement est de 50 à 60 kilogrammes.

L'effort que l'homme peut exercer avec les bras est d'environ 80 kilogrammes.

Le plus grand poids qu'il peut porter est ordinairement 150 kilogrammes, et s'élève parfois à 450 kilogr.; celui qu'il peut soulever varie de 200 à 300 kilogr.

La vitesse du coureur peut être de 13 mètres par seconde pendant quelques instants, la vitesse ordinaire est de 7 mètres, celle de la marche d'environ 2 mètres, et celle du voyageur $1^{m},60$.

La force moyenne des femmes est égale à celle d'un adulte de 15 à 16 ans, et ne surpasse pas les deux tiers de celle de l'homme.

Un ouvrier exercé, de même force qu'un autre, fait souvent un travail double et même triple sans éprouver plus de fatigue.

Un manœuvre qui monte un escalier sans charge prend, pendant un travail journalier de 8 heures, une vitesse de $0^{m}.15$.

Le pas horizontal de l'homme est de $0^{m}.65$. La plus grande hauteur verticale que l'homme qui travaille puisse franchir sans gêne est de $0^{m}.25$.

Le soldat chargé de 15 à 20 kilogrammes, sur un beau chemin en pays de plaine, peut parcourir 49 kilomètres en 10 heures de marche par jour. La marche ordinaire de nos armées varie de 28 à 36 kilomètres par jour; pendant les guerres du premier empire français, cette vitesse a même atteint quelquefois 48 et même 60 kilomètres.

Un colporteur chargé de 44 kilogrammes parcourt 20 kilomètres par jour.

Les portefaix de Rive-de-Gier qui chargent les bateaux portent un hectolitre de houille de 85 kilogrammes à 36 mètres, et font de 290 à 300 voyages par jour.

D'après Coulomb, un homme qui porte des fardeaux à une assez grande distance et revient à vide, peut porter $61^{k}.25$, et parcourir dans sa journée 11 kilomètres avec cette charge, et par conséquent la même distance à vide.

Sur un sol horizontal, un homme transporte, dans sa journée de 10 heures, en 500 brouettées de 60 kilogrammes, 20 mètres cubes de terre à 30 mètres.

D'après Coulomb, le travail utile maximum d'un homme qui monte en portant une charge de 65 à 70 kilogrammes n'est que le 1/4 du travail qu'il peut développer lorsqu'il monte libre et sans charge.

Dans des terrassements exécutés au fort de Vincennes, où l'homme élevait les matériaux par le poids de son corps, chaque manœuvre élevait dans sa journée 310 fois le poids de son corps à 13 mètres de hauteur.

Le poids des chevaux varie de 300 à 700 kilogrammes; il existe même des petits chevaux, appelés *poneys*, dont le poids est à peine de 200 kilogrammes. Celui des chevaux de malles-postes ou de diligences est ordinairement de 450 kilogrammes.

Le plus grand effort des chevaux de trait varie de 300 à 500 kilogrammes.

La plus grande vitesse que puisse prendre un cheval dans une course d'un quart d'heure ne dépasse pas 14 à 15 mètres (courses du Champ-de-Mars); la vitesse du cheval au galop est de 10 mètres; au trot, elle est de $3^{m}.50$ à 4 mètres; au grand pas, de 2 mètres, et au petit pas, de 1 mètre.

Les chevaux de malles-postes traînent 500 kilogrammes à la vitesse de $4^{m}.44$, et parcourent 20 kilomètres par jour, ceux des diligences, 800 kilogrammes à la vitesse de $3^{m}.33$, et parcourent 24 kilomètres; ceux des chasse-marée, 560 kilogrammes à la vitesse de $2^{m}.20$, et parcourent 32 kilomètres.

Sur le dos, la charge du cheval est moyennement de 100 à 175 kilogrammes; les pelletiers anglais la portent quelquefois à 200 ou 250 kilogrammes à une faible vitesse.

Un cheval portant son cavalier du poids de 80 kilogrammes et marchant pendant 7 heures parcourt 40 kilomètres, ce qui donne une vitesse de $1^{m}.59$.

40. Le tableau suivant, qui donne le rapport de l'effort de tirage à la charge traînée, voiture comprise, sur les différentes espèces de chemins, permet de comparer l'*effet utile* produit par les moteurs animés, dans le transport horizontal des fardeaux sur ces chemins, au travail dépensé par ces moteurs. Ce tableau est le résultat des expériences de MM. Boulard, Rumford, Régnier et de quelques autres observateurs.

| NATURE DE LA VOIE SUPPOSÉE HORIZONTALE. | RAPPORT du tirage à la charge totale. |
|---|---|
| Terrain naturel, non battu et argileux, mais sec. | 0.250 |
| *Id.* *id.* siliceux et crayeux. | 0.165 |
| Terrain ferme battu et très-uni. | 0.040 |
| Chaussée en sable ou cailloutis nouvellement placés. | 0.125 |
| *Id.* en empierrement, à l'état d'entretien ordinaire. | 0.080 |
| *Id.* *id.* parfaitement entretenu et roulante. | 0.033 |
| *Id.* pavée à la manière ordinaire, et la voiture étant suspendue. { au pas. | 0.030 |
| { au grand trot. | 0.070 |
| *Id.* pavée en carreaux de grès bien entretenus. { au pas. | 0.025 |
| { au grand trot. | 0.060 |
| *Id.* en madriers de chêne non rabotés. | 0.022 |
| Chemins à ornières plates, en fonte de fer, ou en dalles très-dures et très-unies. | 0.010 |
| Chemins de fer à ornières saillantes, en bon état d'entretien. | 0.007 |
| *Id.* *id.* parfaitement entretenues, et les essieux continuellement huilés. | 0.005 |

Le poids de la voiture varie ordinairement entre le 1/3 et le 1/4 de la charge totale.

**42.** *TABLEAU des efforts qu'un manœuvre de force ordinaire peut exercer pendant un court intervalle de temps, en agissant sur différents outils.*

| DÉSIGNATION DES INSTRUMENTS. | EFFORT en kilogrammes. |
|---|---|
| Une plane | 45 |
| Une tarrière avec les deux mains | 45 |
| Un clef d'écrou | 38 |
| Un étau ordinaire en agissant sur la clef | 33 |
| Un ciseau ou un foret dans le sens vertical | 33 |
| Une manivelle | 30 |
| Une tenaille ou une pince, en agissant par compression | 27 |
| Un rabot à main | 23 |
| Un étau à main | 20 |
| Une scie à main | 16 |
| Un vilebrequin | 7 |
| Un petit tournevis, ou en tournant avec le pouce et les doigts | 6 |

## PESANTEURS SPÉCIFIQUES.

**43.** La *densité* ou la *pesanteur spécifique*, ou encore le *poids spécifique* d'un corps, est le nombre d'unités de poids que pèse l'unité de volume de ce corps.

Comme on a l'habitude de prendre pour unité de poids le kilogramme, et pour unité de volume le décimètre cube, la densité d'un corps est le nombre qui exprime combien un décimètre cube de ce corps pèse de kilogrammes : ainsi, le poids d'un décimètre cube d'eau distillée à son maximum de densité, c'est-à-dire à la température de 4°, étant 1 kil., la densité de cette eau est égale à un.

De cette définition, il résulte qu'en général on a

$$d = \frac{P}{V}, \quad \text{d'où} \quad P = dV \quad \text{et} \quad V = \frac{P}{d}.$$

$d$ densité ;
P poids du corps en kilogrammes ;
V volume du corps en décimètres cubes.

*Applications :* 1° Le poids d'un morceau de fer est $35^k,046$ et son volume $4^{d.c.},5$ ; quelle est sa densité ?

La première des formules précédentes donne

$$d = \frac{35,046}{4,5} = 7,788.$$

2° Quel est le poids d'un morceau de fer dont le volume est $4^{d.c.},5$ ? La densité du fer étant 7,788, la 2e des formules précédentes donne

$$P = 7{,}788 \times 4{,}5 = 35^{k},046.$$

3° Pour $P = 35^{k},046$ et $d = 7{,}788$, la 3e des formules précédentes donne

$$V = \frac{35^{k},046}{7{,}788} = 4^{d.c.},5.$$

**44.** *Remarques :* 1° Dans la pratique, on peut, sans inconvénient, supposer que la densité de l'eau ordinaire est égale à l'unité, au lieu de 0,9987 qu'elle est moyennement dans nos climats, et, de plus, aux températures ordinaires de l'atmosphère, on peut, sans erreur sensible, négliger l'influence de la dilatation sur la densité des corps.

2° Pour les gaz et les vapeurs, on prend pour unité de densité la densité de l'air à la température de 0° et sous la pression atmosphérique de $0^{m},76$ de mercure.

Par rapport à l'eau, la densité de l'air à 0° et sous la pression $0^{m},76$ est, d'après MM. Biot et Arago, $\frac{1}{770} = 0{,}001299$, et plus rigoureusement, 0,001299541 ; par rapport au mercure, elle est $\frac{1}{10366} = 0{,}000096$.

D'après les expériences plus récentes de M. Regnault, 1 litre d'air à 0 et sous la pression de $0^{m},76$ pèse $1^{s},293187$, 1 litre d'eau au maximum de densité pèse $1000^{s},00$, et le poids de 1 litre de mercure à 0° est $13595^{s},93$. Par rapport à l'eau, la densité de l'air à 0° et sous la pression $0^{m},76$ est 0,001293187, et par rapport au mercure, elle est 0,0000951 (consulter le tableau suivant) :

**45.** *TABLEAU des densités de quelques corps.*

| SOLIDES. | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| DÉSIGNATION DES CORPS. | | DENSITÉ. | DÉSIGNATION DES CORPS. | | DENSITÉ. |
| Platine. | écroui. . . . . | 23.000 0 | Iridium. . . . . | | 18.600 0 |
| | laminé. . . . . | 22.069 0 | Tungstène. . . . . | | 17.000 0 |
| | passé à la filière. . | 21.041 7 | Mercure. . . . . | | 13.598 0 |
| | forgé. . . . . | 20.336 6 | Palladium.. . . . . | | 11.8 |
| | purifié. . . . . | 19.500 0 | Plomb. . . . . | | 11.445 |
| Or. . . | forgé. . . . . | 19.361 7 | Rhodium, environ. . . . . | | 10.6 |
| | coulé. . . . . | 19.258 1 | Argent fondu . . . . . | | 10.474 3 |
| | monnaie de France. | 17.65 | Bismuth. . . . . | | 9.9 |

SOLIDES (*Suite*).

| DESIGNATION DES CORPS. | DENSITE. | DÉSIGNATION DES CORPS. | DENSITÉ. |
|---|---|---|---|
| Cuivre en fil | 8.878 5 | Cristal de roche pur | 2.653 0 |
| Nickel, environ | 8.8 | Quartz-agate | 2.615 0 |
| Cuivre rouge fondu | 8.788 0 | Feldspath limpide | 2.564 4 |
| Bronze écroui | 8.70 | Aluminium | 2.560 |
| Bronze d'artillerie | 8.67 | Verre de Saint-Gobain | 2.488 2 |
| Cadmium | 8.694 | Porcelaine de la Chine | 2.384 7 |
| Molybdène | 8.611 0 | Chaux sulfatée cristallisée | 2.317 7 |
| Ruthénium, environ | 8.6 | Chaux, environ | 2.3 |
| Cuivre jaune ou laiton | 8.393 | Graphite naturel | 2.20 |
| Sulfure de Mercure, cinabre | 8.1 | Porcelaine de Sèvres | 2.145 7 |
| Urane | 8.100 0 | Potasse, environ | 2.1 |
| Manganèse pur, environ | 8.0 | Soufre natif | 2.033 2 |
| Acier non écroui | 7.816 3 | Soufre fondu | 1.99 |
| Cobalt fondu | 7.811 9 | Azotate de potasse | 1.933 |
| Fer en barre | 7.788 0 | Sel commun | 1.92 |
| Fer, de 7,7 à | 7.9 | Ivoire | 1.917 0 |
| Étain fondu | 7.291 4 | Nitre | 1.90 |
| Fer fondu | 7.207 0 | Albâtre | 1.874 0 |
| Zinc laminé | 7.19 | Chlorure de potassium, environ | 1.84 |
| Zinc fondu | 6.861 0 | Anthracite | 1.800 0 |
| Antimoine, environ | 6.8 | Phosphore, environ | 1.77 |
| Protochlorure de mercure, sublimé corrosif | 6.5 | Alun | 1.720 0 |
| Tellure | 6.115 0 | Houille compacte | 1.329 2 |
| Chrome | 5.900 0 | Jayet | 1.259 0 |
| Arsenic, environ | 5.8 | Succin | 1.078 0 |
| Iode | 4.948 0 | Résine | 1.07 |
| Spath pesant | 4.430 0 | Camphre | 0.986 |
| Jargon de Ceylan | 4.416 1 | Sodium | 0.972 6 |
| Sélénium | 4.320 0 | Cire | 0.97 |
| Rubis oriental | 4.283 3 | Poudre de guerre | 0.95 |
| Topaze orientale | 4.010 7 | Beurre | 0.94 |
| Saphir oriental | 3.994 1 | Glace fondante | 0.930 0 |
| Alumine naturelle | 3.9 | Caoutchouc | 0.925 |
| Topaze de Saxe | 3.564 0 | Potassium | 0.865 1 |
| Béril oriental | 3.548 9 | Bois de hêtre | 0.852 0 |
| Diamants les plus lourds, légèrement colorés en rose | 3.531 0 | Frêne | 0.845 0 |
| Diamants les plus légers | 3.501 0 | If | 0.807 0 |
| Flint-glass anglais | 3.329 3 | Orme rouge | 0.800 0 |
| Spath fluor rouge | 3.191 4 | Orme blanc | 0.67 |
| Tourmaline verte | 3.155 5 | Pommier | 0.733 0 |
| Saphir du Brésil | 3.130 8 | Bois d'oranger | 0.705 0 |
| Asbeste roide | 2.995 8 | Sapin jaune | 0.657 0 |
| Marbre de Paros | 2.837 6 | Tilleul | 0.604 0 |
| Quartz jasp onyx | 2.816 0 | Bois de cyprès | 0.598 0 |
| Emeraude verte | 2.775 5 | Bois de cèdre | 0.561 0 |
| Perles | 2.750 0 | Peuplier blanc d'Espagne | 0.529 0 |
| Chaux carbonatée cristallisée | 2.718 2 | Bois de sassafras | 0.482 0 |
| Quartz-Jaspe | 2.710 4 | Peuplier ordinaire | 0.383 0 |
| Corail | 2.680 0 | Liége | 0.240 0 |

## MINÉRAUX EN POUDRE, d'après M. Beudant.

| DÉSIGNATION DES CORPS. | DENSITÉ. | DÉSIGNATION DES CORPS. | DENSITÉ. |
|---|---|---|---|
| Sulfure de plomb. . . . . | 7.759 | Aragonite. . . . . | 2.947 |
| Carbonate de plomb. . . . | 6.729 | Carbonate de chaux. . . . | 2.723 |
| Malachite. . . . . | 3.590 | Quartz. . . . . | 2 654 |
| Sulfate de strontiane. . . . | 2.959 | Gypse. . . . . | 2.332 |

## LIQUIDES.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Mercure. . . . . | 13.598 0 | Acide acétique monohydraté à 18°. . . . . | 1.063 |
| *Id.* (d'après M. Regnault). | 13.595 93 | Éther sulfureux. . . . . | 1.085 |
| Brome. . . . . | 2.97 | *Id.* (d'après M. Pierre). . . | 1.106 3 |
| *Id.* (d'après M. Pierre). . . | 3.187 18 | Eau de la mer. . . . . | 1.026 3 |
| Acide sulfurique concentré, consistance oléagineuse. . | 1.843 | Lait. . . . . | 1.030 0 |
| *Id.* sortant des chambres en plomb, de 1.35 à. . . . | 1.50 | Eau distillée. . . . . | 1.000 0 |
| *Id.* concentré dans les chaudières en plomb, environ. . | 1.75 | Vin de Bordeaux. . . . . | 0.993 9 |
| *Id.* concentré dans une cornue en platine. . . . . | 1.85 | Vin de Bourgogne. . . . . | 0.991 5 |
| Chlorure d'azote. . . . . | 1.653 | Acide butyrique. . . . . | 0.963 |
| Acide azoteux. . . . . | 1.550 0 | Huile de lin. . . . . | 0.94 |
| Chloroforme. . . . . | 1.525 23 | Huile de pavots. . . . . | 0.93 |
| Chlorure de silicium. . . . | 1.52 | Huile d'olives. . . . . | 0.915 3 |
| Sulfure de carbone à 0°. . . | 1.293 | Éther acétique à 0°. . . . | 0.907 |
| *Id.* à 15°. . . . . | 1.271 | Éther azoteux. . . . . | 0.886 |
| Liqueur des Hollandais à 0°. | 1.280 | Huile essentielle de térébenthine. . . . . | 0.875 |
| Acide lactique très-concentré. | 1.22 | Bitume liquide, dit naphte. . | 0.847 5 |
| Eau de la mer Morte. . . . | 1.240 3 | Acétal pur. . . . . | 0.844 |
| Acide azotique. . . . . | 1.217 5 | Huile de naphte ou pétrole. . | 0.84 |
| *Id.* le plus concentré, contenant 14 p. 0/0 d'eau. . . | 1.522 | Alcool du commerce. . . . | 0.84 |
| *Id.* contenant 40 p. 0/0 d'eau | 1.42 | Alcool absolu. . . . . | 0.792 |
| Éther azotique. . . . . | 1.112 | Esprit de bois. . . . . | 0.798 |
| | | Éther sulfurique. . . . . | 0.735 8 |
| | | Acide cyanhydrique. . . . . | 0.697 |

## DENSITÉS de quelques gaz à 0° et sous la pression 0m,76, celle de l'air étant 1.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Air. . . . . | 1.000 0 | Acide carbonique. . . . . | 1.529 |
| Gaz iodhydrique. . . . . | 4.443 | Acide chlorhydrique. . . . | 1.247 4 |
| Chlorure de bore. . . . . | 4.035 | Acide formique. . . . . | 1.235 |
| Fluorure de silicium. . . . | 3.573 5 | Acide hydrosulfurique. . . . | 1.191 2 |
| Gaz chloroxycarbonique. . . | 3.407 * | Hydrogène phosphoré. . . . | 1.185 |
| Acide hypochloreux. . . . . | 2.977 | Oxygène. . . . . | 1.105 6 |
| Acide bromhydrique. . . . | 2.731 | Deutoxyde d'azote. . . . . | 1.038 8 |
| Hydrogène arsénié. . . . . | 2.695 | Hydrogène bicarboné. . . . | 0.978 4 |
| Chlore. . . . . | 2.440 | Azote. . . . . | 0.971 3 |
| Oxyde de chlore. . . . . | 2.315 * | Oxyde de carbone. . . . . | 0.967 4 |
| Fluorure de bore. . . . . | 2.371 | Ammoniaque. . . . . | 0.596 7 |
| Acide sulfureux. . . . . | 2.247 | Hydrogène protocarboné des marais. . . . . | 0.559 |
| Cyanogène. . . . . | 1.860 | Hydrogène. . . . . | 0.069 2 |
| Protoxyde d'azote. . . . . | 1.527 | | |

* Densités calculées.

**DENSITÉS de quelques gaz à 0° et sous la pression 0m.76, celle de l'air étant 1 (d'après les expériences de M. Regnault).**

| DÉSIGNATION DES CORPS. | POIDS du litre de gaz. | DENSITÉ. | DÉSIGNATION DES CORPS. | POIDS du litre de gaz. | DENSITÉ. |
|---|---|---|---|---|---|
| | gr. | | | gr | |
| Air | 1.293 187 | 1.000 00 | Oxygène | 1.429 802 | 1.105 63 |
| Hydrogène | 0.089 578 | 0.069 26 | Acide carbonique | 1.977 414 | 1.529 01 |
| Azote | 1.256 167 | 0.971 37 | | | |

**Densités de quelques vapeurs ramenées par le calcul à 0° et à la pression 0m.76.**

| | | | |
|---|---|---|---|
| Vapeur de protoiodure de mercure | 15.68 | Vapeur de naphtaline | 4.528 0 |
| — d'arsenic | 10.37 | — de chlorure de soufre | 4.468 |
| — de protochlorure de mercure. Sublimé corrosif. | 9.416 | — de phosphore | 4.326 |
| — de perchlorure d'étain | 9.200 | — de chlorure de bore | 3.942 |
| — d'iode | 8.716 | — de perchlorure de phosphore | 3.66 |
| — de sous-chlorure de mercure. Calomel | 8.196 | — de liqueur des Hollandais | 3.45 |
| — de mercure | 6.976 | — d'hydrobicarbonate de chlore | 3.443 |
| — de perchlorure de titane | 6.856 | — nitreuse | 3.180 * |
| — de soufre | 6.654 | — d'acide butyrique | 3.09 |
| — de chlorure d'arsenic | 6.301 | — d'éther acétique | 2.920 |
| — de chlorure de silicium | 5.939 | — d'hydrogène arseniqué | 2.695 |
| — d'éther hydriodique | 5.474 9 | — de sulfure de carbone | 2.67 |
| — d'éther benzoïque | 5.409 | — d'éther sulfurique | 2.586 |
| — de sulfure de mercure. Cinabre | 5.4 | — d'acide fluoborique | 2.312 |
| — de brome | 5.39 | — d'éther hydrochlorique | 2.219 |
| — de camphre | 5.32 | — d'acide chlorocyanique | 2.122 8* |
| — d'éther oxalique | 5.087 | — d'alcool absolu | 1.589 0 |
| — d'essence de térébenthine | 4.76 | — d'acide formique | 1.554 |
| — de protochlorure de phosphore | 4.744 | — d'acide hydrocyanique | 0.947 |
| | | — de carbone | 0.890 |
| | | — d'eau | 0.623 5 |

* Densités calculées.

Dans la pratique, on peut admettre que la densité de la vapeur d'eau, à une pression quelconque, est les 4/5 de celle de l'air à la même température et à la même pression.

46. *TABLEAU du poids d'un mètre cube de divers corps dont les densités n'ont pu être déterminées d'une manière aussi précise que pour les précédents.*

M. PONCELET, *Introduction à la mécanique industrielle.*

| DÉSIGNATION DES SUBSTANCES. | POIDS du mètre cube. | DÉSIGNATION DES SUBSTANCES. | POIDS du mètre cube. |
|---|---|---|---|
| | kil. | | kil. |
| Pierre à plâtre ordinaire. . . . | 2 168 | Terre argileuse. . . . . | 1 600 |
| Gypse ou plâtre fin. . . . . | 2 264 | Terre glaise. . . . . | 1 900 |
| Pierre meulière. . . . . | 2 484 | Maçonnerie de moellons ordinaires, de 1 700 kil. à. . . . | 2 300 |
| Marbre noir et blanc. . . . . | 2 717 | Chêne le plus pesant, le cœur. | 1 170 |
| Briques { les plus cuites . . . | 2 200 | Chêne le plus léger, sec. . . . | 850 |
| Briques { les moins cuites. . . | 1 500 | Huile de lin. . . . . | 940 |
| Tuiles ordinaires. . . . . | 2 000 | Huile de navette. . . . . | 919 |
| Sable pur. . . . . | 1 900 | Alcool ordinaire ou esprit-de-vin. . . . . | 837 |
| Sable terreux. . . . . | 1 700 | | |
| Terre végétale légère. . . . . | 1 400 | | |

GÉNIEYS, *Recueil de tables.*

| DÉSIGNATION DES SUBSTANCES. | POIDS du mètre cube de | POIDS du mètre cube à |
|---|---|---|
| 1° *Substances d'origine minérale.* | kil. | kil. |
| Eau. . . { distillée et de pluie. . . . . | » | 1 000 |
| Eau. . . { de rivière, environ. . . . . | » | 1 000 |
| Eau. . . { de puits. . . . . | 1 000 | 1 014 |
| Eau. . . { de mer. . . . . | 1 028 | 1 042 |
| Terre ou sable de bruyère. . . . . | 614 | 643 |
| Terreau. . . . . | 828 | 857 |
| Tourbe { sèche. . . . . | 514 | » |
| Tourbe { humide. . . . . | 785 | » |
| Terre végétale. . . . . | 1 214 | 1 285 |
| Terre forte graveleuse . . . . . | 1 357 | 1 428 |
| Vase. . . . . | 1 642 | » |
| Argile et glaise. . . . . | 1 656 | 1 756 |
| Marne. . . . . | 1 571 | 1 642 |
| Sable. . { fin et sec. . . . . | 1 399 | 1 428 |
| Sable. . { fin et humide . . . . . | 1 900 | » |
| Sable. . { fossile argileux. . . . . | 1 713 | 1 799 |
| Sable. . { de rivière humide. . . . . | 1 771 | 1 856 |
| Gravier cailloutis. . . . . | 1 371 | 1 485 |
| Grosse terre mêlée de sable et de gravier. . . . . | 1 860 | » |
| Terre mêlée de petites pierres. . . . . | 1 910 | » |
| Argile mêlée de tuf. . . . . | 1 990 | » |
| Terre grasse mêlée de cailloux. . . . . | 2 290 | » |
| Écalins de roches . . . . . | 1 571 | 1 713 |
| Ciment de terre cuite. . . . . | 1 171 | 1 228 |
| Mâchefer, scories de forges. . . . . | 771 | 985 |
| Laitier vitreux. . . . . | 1 428 | 1 485 |

| DÉSIGNATION DES SUBSTANCES. | | POIDS du mètre cube de | POIDS du mètre cube à |
|---|---|---|---|
| | | kil. | kil. |
| Pouzzolane | d'Italie | 1 157 | 1 228 |
| | du Vivarais | 1 085 | 1 128 |
| Trass de Hollande ou trass d'Andernach | | 1 071 | 1 085 |
| Pierre ponce | | 557 | 928 |
| Chaux | vive sortant du four | 800 | 857 |
| | éteinte, en pâte ferme | 1 328 | 1 428 |
| Mortier de chaux et de | sable | 1 856 | 2 142 |
| | ciment | 1 656 | 1 713 |
| | mâchefer | 1 128 | 1 214 |
| | laitier | 1 856 | 1 942 |
| Brique | | 1 000 | 1 471 |
| Ardoise, environ | | 2 600 | » |
| Craie | | 1 214 | 1 285 |
| Pierre à bâtir | tendre | 1 142 | 1 713 |
| | franche demi-roche | 1 713 | 1 999 |
| | liais doux et roche | 2 142 | 2 284 |
| | roches dures, liais | 2 284 | 2 427 |
| | très-compacte, cliquart | 2 499 | 2 713 |
| Albâtres, marbres, brèches, lumachelles, brocatelles | | 2 199 | 2 870 |
| Chaux fluatée, spath fluor | | 3 084 | 3 184 |
| Chaux fluatée calcarifère, gypse ou pierre à plâtre crue et alabastrite | | 1 899 | 2 299 |
| Plâtre cuit battu | | 1 199 | 1 228 |
| *Id.* tamisé | | 1 242 | 1 257 |
| L'eau pour gâcher pèse | | 328 | 343 |
| Plâtre gâché humide | | 1 571 | 1 599 |
| *Id.* sec | | 1 399 | 1 414 |
| L'eau vaporisée pèse | | 171 | 186 |
| L'eau combinée par cristallisation pèse | | 157 | 157 |
| Maçonnerie fraîche en | moellons | 2 230 | 2 250 |
| | briques | 1 860 | 1 890 |
| Baryte | | 4 284 | 4 626 |
| Quartz, pierre meulière poreuse | | 1 242 | 1 285 |
| *Id.* *id.* | compacte écailleuse | 2 485 | 2 613 |
| Quartz hyalin | | 2 642 | 2 656 |
| Quartz arénacé ou grès à bâtir | | 1 928 | 2 070 |
| *Id.* | à paveur | 2 427 | 2 613 |
| Quartz résinite pechstein ou pierre de poix | | 2 042 | 2 656 |
| Quartz ou silex pyromaque, pouding | | 2 370 | 2 927 |
| Jaspe | | 2 356 | 2 813 |
| Feldspath, pétrosilex | | 2 570 | 2 742 |
| Trapp, cornéenne, pierre de touche | | 2 699 | 2 742 |
| Porphyre, ophile, serpentine variolite | | 2 756 | 2 927 |
| Talc, stéatite, chlorite | | 2 613 | 2 784 |
| Serpentine | | 2 770 | 2 856 |
| Pierre ollaire | | 2 742 | 2 856 |
| Granite, siénite, gneiss | | 2 356 | 2 956 |
| Granitelle | | 2 799 | 3 056 |
| Mica | | 2 570 | 2 927 |
| Amiante | | 1 556 | 1 785 |
| Schiste | grossier | 1 813 | 2 784 |
| | tégulaire, ardoise | 2 742 | 2 856 |
| Trématode, pierre de Volvic | | 1 928 | 2 642 |
| Laves, lithoïdes, basaltes | | 2 756 | 3 056 |

| DÉSIGNATION DES SUBSTANCES. | POIDS du mètre cube de | POIDS du mètre cube à |
|---|---|---|
| | kil. | kil. |
| Laves du Vésuve | 1 713 | 2 813 |
| Tufs volcaniques | 1 214 | 1 385 |
| Scories volcaniques | 785 | 885 |
| Houille, charbon de terre | 942 | 1 328 |
| **2° *Métaux.*** | | |
| Or à 24 carats, fondu, forgé | » | 19 065 |
| Argent à 12 deniers, fondu, forgé | » | 11 494 |
| Platine passé à la filière | » | 21 039 |
| Cuivre : rouge fondu | » | 7 783 |
| Cuivre : passé à la filière | » | 8 540 |
| Cuivre : jaune, passé à la filière | » | 8 540 |
| Fer : fondu | » | 7 202 |
| Fer : forgé | » | 7 783 |
| Acier : non trempé | » | 7 829 |
| Acier : écroui, trempé | » | 7 813 |
| Étain : pur de Cornwall, fondu | » | 7 287 |
| Étain : neuf, fondu, écroui | » | 7 307 |
| Étain : fin, fondu, écroui | » | 7 515 |
| Étain : commun, fondu | » | 7 915 |
| Étain : dit *clair étoffe*, fondu | » | 8 439 |
| Fonte blanche | » | 7 500 |
| *Id.* grise | » | 7 200 |
| *Id.* noire | » | 7 260 |
| Plomb fondu | » | 11 346 |
| Zinc fondu | » | 7 138 |
| Mercure coulant | » | 13 568 |

| | | Un carreau humide. | Un carreau sec. |
|---|---|---|---|
| **3° *Carreaux de plâtras et plâtre.*** | | | |
| Pour cloisons légères, 0m.487 sur 0m.325 et | 0m.0677 d'épaisseur | 15 | 12 |
| | 0 .0812 *id.* | 18 | 15 |
| | 0 .0947 *id.* | 21 | 17 |
| | 0 .1083 *id.* | 23 | 20 |

| | Long. | Larg. | Épaiss. | Le cent de compte. | |
|---|---|---|---|---|---|
| Briques de Bourgogne | 0m.226 | 0.108 | 0.054 | 241 | 428 |
| Briques de Montereau | 0 .217 | 0.108 | 0.050 | 208 | 214 |
| Briques de Sarcelles | 0 .210 | 0.088 | 0.047 | 180 | 184 |
| Brique flottante composée de farine volcanique | 0 .189 | 0.115 | 0.045 | 44 | » |
| Ardoise carrée forte | | | | 45 | 47 |
| *Id.* *id.* fine | | | | 36 | 38 |
| *Id.* carrelette | | | | 22 | 23 |
| Le mètre carré de voliges employé en couverture | | | | 5 | 5,3 |
| Tuiles de Bourgogne, grand moule de 0m.298 sur 0.244 et 0.0135 | | | | 223 | 225 |
| Tuiles de Bourgogne, grand moule faîtières de 0m.352 | | | | 379 | 385 |
| *Id.* petit moule de 0m.244 sur 0.162 et 0.014 | | | | 159 | 162 |
| *Id.* petit moule faîtières de 0m.352 | | | | 328 | 330 |
| Tuiles de Sarcelles, de 0m.257 sur 0.162 et 0.018 | | | | 112 | 116 |
| *Id.* faîtières de 0m.325 | | | | » | 245 |
| Carreaux de 0m.162, à six pans, de Bourgogne | | | | 84 | » |
| Carreaux de 0m.162, à six pans, de Sarcelles | | | | 74 | » |

| DÉSIGNATION DES SUBSTANCES. | POIDS du mètre cube de | à |
|---|---|---|
| *4° Bois.* | kil. | kil. |
| Abricotier | 771 | » |
| Acacia (faux) | 785 | 800 |
| Alisier | 871 | 885 |
| Acajou | 785 | 914 |
| Amandier | 110 | » |
| Arbre de Judée | 685 | » |
| Aune | 510 | 800 |
| Bouleau commun | 700 | 714 |
| *Id.* merisier | 571 | » |
| Buis de France | 900 | 914 |
| *Id.* de Mahon | 914 | 928 |
| *Id.* de Hollande | 1 314 | 1 328 |
| Catalpa | 457 | 471 |
| Cèdre du Liban | 557 | 600 |
| *Id.* des Indes | 1 314 | » |
| Cerisier commun | 714 | 743 |
| *Id.* de Sainte-Lucie | 857 | 871 |
| Charbon de bois | 330 | » |
| Charme | 757 | » |
| Châtaignier | 685 | 1 100 |
| Chêne vert | 930 | 1 220 |
| Chêne sec | 643 | 1 015 |
| Cognassier | 700 | 985 |
| Cormier | 900 | 914 |
| Coudrier noisetier | 600 | » |
| Cyprès pyramidal | 600 | 657 |
| *Id.* étalé | 571 | » |
| Ébénier des Alpes | 1 042 | » |
| *Id.* d'Amérique | 1 199 | 1 328 |
| Érable sycomore | 643 | » |
| *Id.* de Virginie | 628 | 757 |
| *Id.* jaspé | 543 | 557 |
| Févier épineux | 814 | 828 |
| *Id.* sans épines | 771 | 785 |
| Frêne | 785 | » |
| Gaïac | 1 328 | 1 342 |
| Genévrier | 543 | 557 |
| Grenadier | 1 342 | 1 357 |
| Hêtre | 714 | 857 |
| If de Hollande | 771 | » |
| If d'Espagne | 814 | » |
| Laurier d'Espagne | 814 | 828 |
| Marronnier | 657 | » |
| Mélèze | 657 | » |
| Mûrier | 885 | 900 |
| Néflier | 942 | » |
| Noyer de France | 600 | 685 |
| Noyer d'Afrique | 728 | 743 |
| Olivier | 914 | 928 |
| Oranger | 700 | » |
| Orme | 743 | 942 |
| Osier | 543 | » |

| DÉSIGNATION DES SUBSTANCES. | POIDS du mètre cube de | POIDS du mètre cube à |
|---|---|---|
| | kil. | kil. |
| Peuplier d'Italie | 371 | 414 |
| *Id.* de Hollande | 528 | 614 |
| Pin du Nord | 814 | 828 |
| Platane d'Orient | 700 | 714 |
| *Id.* d'Occident | 628 | » |
| Poirier | 600 | 714 |
| Pommier | 757 | 800 |
| Prunier | 714 | 790 |
| Sapin abies | 460 | » |
| *Id.* épicéa | 528 | 557 |
| *Id.* jaune aurore | 671 | » |
| Saule | 571 | 585 |
| Sorbier des oiseleurs | 743 | » |
| Sureau | 685 | 700 |
| Sycomore | 640 | » |
| Tilleul | 557 | 600 |
| Tulipier | 471 | 485 |
| Thuya de la Chine | 557 | 571 |
| Aylande, dit *vernis du Japon* | 814 | 828 |
| Vigne | 1 314 | 1 328 |
| Cordes en chanvre, environ | 915 | » |

## MACHINES EN GÉNÉRAL.

**47.** Une *machine* est un système matériel composé de différents corps ou organes tellement reliés entre eux, que tout mouvement de l'un, compatible avec la solidité du système, entraîne des mouvements relatifs déterminés pour chacun des autres. Son but est de transmettre le travail des forces.

Les mouvements relatifs des différents organes d'une machine ne sont pas seulement déterminés en direction, mais aussi en intensité. Généralement, les mouvements sont périodiques uniformes (8), et la vitesse est mise en harmonie avec les exigences des travaux industriels à produire, sans que jamais elle atteigne la limite à laquelle la solidité de la machine serait compromise.

**48.** Sur une machine en mouvement agissent différentes forces que l'on peut diviser en trois classes :

1° *Les forces mouvantes ou motrices.* Ce sont les forces qui agissent dans le sens du mouvement des organes qu'elles sollicitent ; c'est par conséquent à elles qu'est dû le mouvement de la machine ;

2° *Les résistances utiles*, qui sont les forces que les matières sur lesquelles opère la machine opposent au mouvement des organes qui les sollicitent ;

3° *Les résistances passives ou nuisibles*, ou les forces qui naissent du mouvement des différents organes de la machine pour s'opposer à ce mouvement; elles sont dues au frottement de ces organes entre eux ou sur des corps étrangers, aux chocs qui peuvent avoir lieu entre ces organes par suite de changements brusques de vitesse ou de direction, à la roideur des cordes ou courroies, etc.

49. Considérant les forces motrices comme positives, puisqu'elles agissent dans le sens du mouvement, les résistances utiles et les résistances nuisibles sont négatives. Par conséquent, si l'on suppose le système animé d'un mouvement uniforme, la somme des travaux de toutes les forces pour un temps quelconque sera nulle, puisque le gain ou la perte de force vive est nulle, et on aura (30 et *Int.*, 1489)

$$\mathcal{T}_m - \mathcal{T}_u - \mathcal{T}_n = 0 \quad \text{ou} \quad \mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_n.$$

Ce qui fait voir que, *le mouvement étant uniforme, le travail moteur* $\mathcal{T}_m$ *dû aux forces motrices est égal au travail utile* $\mathcal{T}_u$ *dû aux résistances utiles, plus le travail nuisible* $\mathcal{T}_n$ *dû aux résistances passives.*

*Réciproquement*, si, à chaque instant, cette équation subsiste, le mouvement est uniforme; car la vitesse ne peut varier qu'autant que la somme des travaux de toutes les forces n'est pas nulle.

*Lorsque, dans une machine, cette formule existe, on dit qu'il y a équilibre dynamique.*

Quand le mouvement de la machine est périodique uniforme (8), le gain ou la perte de force vive, pendant un certain temps, n'est nul que pour la durée d'un nombre entier de périodes; pour ce temps, on a encore

$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_n.$$

On dit alors que la machine est en *équilibre dynamique périodique*: c'est l'état ordinaire des machines, non-seulement à cause de la forme de leurs organes, mais aussi à cause des variations plus ou moins grandes des forces motrices et surtout des résistances.

50. *Impossibilité du mouvement perpétuel.* Dans le cas où on néglige les résistances passives, la formule précédente devient

$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u.$$

Ce qui fait voir que *le travail utile* $\mathcal{T}_u$ *est égal au travail moteur* $\mathcal{T}_m$.

Il est impossible de réaliser ce résultat dans la pratique; car, dans une machine quelconque, il y a toujours des résistances passives qui diminuent le travail utile.

Le travail nuisible, inévitable, des résistances passives fait voir l'impossibilité d'obtenir le mouvement perpétuel. Que cette vérité n'a-t-elle été mieux répandue plus tôt, et que ne l'est-elle davantage encore au-

jourd'hui ; elle aurait évité et éviterait bien des déceptions à de pauvres malheureux qui croient ce mouvement réalisable!

Il est évident que s'il n'y avait pas de résistances passives, c'est-à-dire si l'on avait $T_m = T_u$, on pourrait obtenir le mouvement perpétuel ; puisque, par exemple, à l'aide d'une quantité d'eau tombant d'une certaine hauteur, on pourrait en élever une même quantité à la même hauteur ; celle-ci pourrait ensuite faire monter la première à la même hauteur, puis la première élever la seconde, et ainsi de suite indéfiniment. Un pendule écarté de la verticale oscillerait indéfiniment sans la résistance de l'air et le frottement de son axe de suspension.

**31.** P étant la force motrice agissant sur une machine quelconque, et Q la résistance utile vaincue par cette machine, E et $e$ étant les espaces parcourus par les points d'application de P et Q dans les directions de ces forces et dans un même temps quelconque, au commencement et à la fin duquel la vitesse de la machine est la même, l'équation d'équilibre dynamique donne, en supposant nulles les résistances passives,

$$P \times E = Q \times e \quad \text{ou} \quad P : Q = e : E.$$

De l'égalité entre le travail de la puissance et celui de la résistance, il résulte que pour un même travail moteur $P \times E$, selon que la force Q sera multipliée par $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{2}$, 2, 3..., l'espace $e$ sera respectivement divisé par les mêmes nombres ; d'où découle la maxime bien connue : *Ce qu'on gagne en force, on le perd en espace, ou*, ce qui revient au même, *en vitesse.*

La proportion précédente permet de calculer l'une quelconque des quatre quantités P, Q, E, $e$, quand on connaît les trois autres.

Pour une machine quelconque, simple ou compliquée, s'il s'agit de trouver quelle sera la résistance Q que pourra vaincre une puissance P, on détermine les espaces E et $e$ parcourus dans le même temps par les points d'application des forces P et Q. E et $e$ sont quelconques si ces points d'application ont des mouvements uniformes ; mais on les prend correspondants à un nombre entier de périodes si le mouvement de la machine est périodique. Lorsque la machine est construite, c'est en la mettant en mouvement d'une manière quelconque que l'on détermine les valeurs de E et $e$. Lorsqu'elle n'est qu'en dessin, d'une valeur E on déduit celle de $e$ d'après les rapports des espaces parcourus par les différents organes qui transmettent le mouvement du point d'application de P à celui de Q.

Supposons que la résistance à vaincre $Q = 100^k$, et qu'il s'agisse de déterminer quelle sera la puissance P en négligeant les résistances passives.

On détermine les valeurs correspondantes de E et $e$ en opérant

comme il vient d'être indiqué, soit $E = 2^m,5$ et $e = 0^m,80$; puis on remplace les lettres par leurs valeurs dans la proportion précédente, ce qui donne

$$P : 100^k = 0,80 : 2,5, \quad \text{d'où} \quad P = \frac{100 \times 0,80}{2,5} = 32^k.$$

Si l'on avait donné la puissance P, on aurait déterminé Q en opérant comme pour P.

*Pour avoir la force théorique en chevaux-vapeur* (36), on constate le temps pendant lequel les espaces E et $e$ sont parcourus quand la machine est en marche normale, et les produits égaux $P \times E$ et $Q \times e$ donnent chacun le nombre de kilogrammètres produit par P ou absorbé par Q dans ce temps; divisant ce nombre de kilogrammètres par ce temps exprimé en secondes, on a la puissance de la machine en kilogrammètres par seconde. Ce nombre de kilogrammètres divisé par 75 donne la puissance de la machine en chevaux. Si, dans l'exemple précédent, E et $e$ sont parcourus en $1'',5$, $P \times E = 32 \times 2,5 = Q \times e = 100 \times 0,80 = 80^{km}$ est le nombre de kilogrammètres produit et absorbé en $1'',5$; $\frac{80}{1,5} = 53^{km},33$ est la puissance de la machine en kilogrammètres par seconde, et $\frac{53,33}{75} = 0,71$ est sa puissance en chevaux-vapeur.

52. Souvent, dans la pratique, on a la puissance dont on peut disposer en chevaux; supposons qu'elle soit de 25 chevaux. Pour calculer P et Q, on commence par déterminer $E = 3^m$ et $e = 0^m,8$, en opérant comme il a été indiqué (51). La durée de ces parcours étant $1'',4$, le travail produit par la machine dans ce temps est de $75 \times 25 \times 1,4 = 2625^{km}$; on a donc

$$P \times E = P \times 3 = 2625, \quad \text{d'où} \quad P = \frac{2625}{3} = 875^k.$$

Ayant P, on peut calculer Q à l'aide de la proportion du n° 51. Du reste, on a encore

$$Q \times e = Q \times 0,8 = 2625, \quad \text{d'où} \quad Q = \frac{2625}{0,8} = 3281^k,25.$$

53. Il peut arriver qu'au lieu d'avoir une seule force motrice, on en ait plusieurs P, P′, P″..... et que l'on ait aussi plusieurs résistances utiles Q, Q′, Q″..... Constatant, comme pour deux forces, les espaces E, E′, E″..... et $e$, $e'$, $e''$..... parcourus dans le même temps par les points d'application des forces dans la direction de ces forces, l'équation

$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u, \qquad (50)$$

au lieu de fournir l'équation du n° 51, donne

$$P \times E + P' \times E' + P'' \times E'' + \ldots\ldots = Q \times e + Q' \times e' + Q'' \times e'' + \ldots\ldots$$

Équation à l'aide de laquelle on déterminera une des quantités qui y entrent connaissant toutes les autres. Les membres de cette équation donnent chacun le travail théorique produit ou absorbé pendant la durée du parcours des espaces correspondants E, E'..... $e$, $e'$..... Connaissant cette durée, on déterminera en kilogrammètres le travail théorique produit ou absorbé pendant une seconde, et ce dernier travail divisé par 75 donnera la puissance en chevaux-vapeur (36). Si l'on avait d'abord donné la puissance en chevaux, par des calculs inverses à ceux que nous venons d'indiquer, le problème aurait fourni, soit pour P, P'... E, E'....., soit pour Q, Q'..... $e$, $e'$....., une infinité de valeurs satisfaisant à l'équation ; mais les valeurs choisies auraient toujours dû donner, pour le premier et pour le deuxième membre de l'équation, une valeur correspondant à 25 chevaux ou $25 \times 75 = 1875^{km}$ par seconde.

54. Dans les machines, surtout dans les machines industrielles, les résistances passives sont assez considérables pour que l'on ne puisse négliger le travail qu'elles absorbent ; l'équilibre dynamique est alors exprimé par

$$T_m = T_u + T_n.$$

Pour un certain déplacement de la machine, les travaux $T_m$, $T_u$ et $T_n$ s'évaluent comme dans le cas précédent ; ainsi, P étant la puissance, Q la résistance utile, R, R'... les différentes résistances passives, et E, $e$, $i$, $i'$... les espaces correspondants parcourus dans le même temps par les points d'application dans la direction de ces forces, on a

$$P \times E = Q \times e + R \times i + R' \times i' + \ldots$$

Équation qui revient à celle du n° 53, dans laquelle on aurait remplacé différentes résistances utiles par des résistances nuisibles.

Il peut arriver qu'une ou plusieurs résistances nuisibles proviennent de chocs entre les organes de la machine. Le travail absorbé par ces résistances n'est plus évalué par un produit d'une force par l'espace que parcourt son point d'application, mais par la perte de force vive due au choc, et cette perte, évaluée en kilogrammètres (99), entre dans le second membre de l'équation comme tous les autres travaux nuisibles $R \times i$, $R' \times i'$...

A l'aide de l'équation précédente, connaissant, dans une machine, deux des trois travaux suivants : le travail moteur $T_m = P \times E$, le travail utile $T_u = Q \times e$, et le travail nuisible $T_n = R \times i + R' \times i' + \ldots$, on détermine le troisième.

55. On se propose ordinairement d'établir une machine capable de produire un travail utile $T_u = Q \times e$ donné. Il faut alors déterminer $T_m = P \times E$ capable de produire non-seulement ce travail utile, mais aussi le travail nuisible. Il faut donc que l'on commence par calculer ce travail nuisible ; ce que l'on fait en déterminant les valeurs des différentes résistances nuisibles R, R'..... en fonction de Q, et par suite $T_n$ en fonction de $T_u$.

Ayant $T_u$ et $T_n$, l'équation du n° 54 donne $T_m$, et l'on peut déterminer le travail moteur en chevaux, comme au n° 53.

56. Le travail moteur $T_m$ étant représenté par 100, et les travaux utile $T_u$ et nuisible $T_n$ étant, par exemple, 75 et 25, on dit que le *rendement* de la machine est de 75 pour cent; la *perte* est alors de 25 pour cent. S'il était possible que la perte fût nulle, le rendement serait de 100 pour cent.

57. *Remarque.* Ce qui vient d'être exposé fait voir l'importance que joue la formule de l'*équilibre* dynamique dans l'établissement des machines. Que de procès souvent désastreux sont dus à ce que cette formule n'ayant pas été convenablement comprise, des machines établies n'ont pas produit le travail qu'on en attendait.

Au point où l'on en est aujourd'hui, la pratique a prononcé sur la quantité de travail nuisible $T_n$ qui a lieu dans les différentes machines industrielles, et on se base généralement sur ces résultats dans les constructions nouvelles, tout en cherchant à diminuer cette perte autant que possible.

Il y a cependant des cas où il peut être nécessaire de se rendre compte de cette perte; c'est pourquoi nous allons étudier les différentes résistances passives, et poser ensuite les équations d'équilibre dynamique des différentes machines simples; équations desquelles on passera facilement à celles des machines les plus compliquées, qui ne sont en général que la réunion d'un certain nombre de ces machines simples.

## FROTTEMENT.

58. La surface d'un corps n'étant jamais parfaitement unie, quel que soit son poli, il en résulte que quand on met deux surfaces en contact, elles se pénètrent toujours plus ou moins. Cet enchevêtrement n'est pas seulement dû à l'imperfection du poli des pièces, mais aussi à ce que les surfaces en contact se pressant mutuellement, il y a une déformation d'autant plus grande que les corps sont moins durs et que la pression de l'un sur l'autre est plus considérable.

De l'enchevêtrement des molécules de deux surfaces en contact, il résulte que si l'on imprime un mouvement à l'un des corps, mais de manière à le laisser toujours en contact avec la surface de l'autre corps,

il naît une résistance qui s'oppose directement au mouvement, et à laquelle on donne le nom de *frottement*.

Si la même partie de la surface d'au moins un des corps reste toujours en contact, c'est-à-dire s'il y a glissement d'un ou de chacun des corps sur l'autre, le frottement prend le nom de *frottement de glissement*. Si, au contraire, les parties des surfaces en contact varient à chaque instant, comme dans le mouvement d'une bille sur un tapis de billard, ou d'une roue de voiture sur une route, le frottement prend le nom de *frottement de roulement*.

39. L'expérience prouve que le frottement est proportionnel à la pression normale que les surfaces exercent l'une sur l'autre, qu'il varie selon la nature et l'état des surfaces en contact, et qu'il est indépendant de la vitesse et de l'étendue de ces surfaces.

Des expériences récentes, faites par M. Jules Poirée sur le chemin de fer de Lyon, ont fait voir que pour des vitesses supérieures à 4 ou 5 mètres par seconde, le frottement diminue à mesure que la vitesse augmente. Dans ces expériences, on a serré les freins d'un wagon de manière à empêcher les roues de tourner, et on l'a fait mouvoir sur les rails comme un traîneau; la vitesse a été portée jusqu'à 22 mètres par seconde, et, à l'aide d'un dynamomètre, on a constaté que le frottement de glissement des roues sur les rails diminuait à mesure que la vitesse devenait plus grande. (Voir la quatrième partie.)

Il convient de remarquer que dans les cas habituels de la pratique, dans les machines, par exemple, la vitesse est loin d'atteindre 4 mètres par seconde, et que l'on peut admettre que le frottement est indépendant de la vitesse.

En lubréfiant les surfaces en contact avec des corps onctueux, tels que l'huile, la graisse, le savon..... on diminue considérablement le frottement, et d'autant plus que l'enduit est renouvelé avec plus de continuité. L'eau pure est un mauvais enduit, surtout pour les métaux; souvent même elle augmente le frottement.

Nous venons de dire que le frottement est proportionnel à la pression des surfaces entre elles; mais cela n'a lieu que jusqu'à une certaine limite; au delà, les surfaces grippent, c'est-à-dire s'entament, et le frottement devient considérable sans varier suivant aucune loi. Les corps onctueux, tout en diminuant le frottement, reculent considérablement la limite à laquelle les surfaces commencent à gripper.

D'après les expériences de Wood, la pression des essieux de wagons dans leurs boîtes ne doit pas dépasser $6^k,33$ par centimètre carré de surface de contact; au-dessus de cette limite, la graisse qui lubréfie les surfaces est écrasée et chassée; alors, les corps, frottant à sec, s'entament, et le frottement devient considérable. Aujourd'hui que le graissage se fait avec soin et régulièrement, la pression peut atteindre 25 et jusqu'à 30 kilogrammes par centimètre carré.

L'expérience prouve aussi que quand deux surfaces ont été en contact et en repos relatif pendant un certain temps, le frottement de glissement est plus considérable au premier instant du mouvement que quand le mouvement a lieu. Cela est d'autant plus sensible que la pression est plus grande, et que les corps sont plus compressibles; ces deux circonstances tendant à faire pénétrer les surfaces et à chasser l'enduit.

**60.** Le rapport entre le frottement F, c'est-à-dire la résistance qui s'oppose directement au mouvement, et la pression P qui s'exerce normalement entre les deux surfaces en contact, est ce que l'on appelle *coefficient de frottement;* ainsi, désignant ce coefficient par $f$, on a

$$f = \frac{F}{P}, \quad \text{d'où} \quad F = fP \quad \text{et} \quad P = \frac{F}{f}.$$

Pour $P = 500^k$ et $f = 0{,}08$, on a $F = 0{,}08 \times 500 = 40$ kil.

Ces formules s'appliquent au premier instant du mouvement, après quelque temps de repos, comme pendant le mouvement; seulement F et $f$ ont d'autres valeurs (61 et 63).

L'expérience prouvant qu'un léger choc, donné sur les corps en contact depuis un certain temps, produit un ébranlement suffisant pour faire commencer le mouvement quand le corps mobile est sollicité par un effort de très-peu supérieur à celui qui est capable de le continuer, dans les applications, pour évaluer le travail absorbé par le frottement, on ne tient compte que du frottement qui s'exerce quand les corps sont déjà en mouvement. On ne tient compte non plus que de ce frottement dans l'évaluation de la stabilité d'une construction soumise à des ébranlements.

Le frottement de roulement, sur lequel nous reviendrons au sujet des chemins de fer, peut être négligé, comparativement au frottement de glissement, quand il s'exerce entre quelques organes d'une machine industrielle (*Int.*, 1504 et suivants).

**61.** *TABLEAU des valeurs du coefficient de frottement des surfaces planes* (60), *d'après les expériences de M. Morin.*

| INDICATION DES SURFACES FROTTANTES. | DISPOSITION des fibres. | ÉTAT des surfaces. | RAPPORT du frottement à la pression | |
|---|---|---|---|---|
| | | | au départ, après quelque temps de contact. | pendant le mouvement. |
| Chêne sur chêne. | Parallèles. | Sans enduit. | 0.62 | 0.48 |
| *Id.* *id.* | *Id.* | Frottées de savon sec. | 0.44 | 0.16 |
| *Id.* *id.* | Perpendiculaires. | Sans enduit. | 0.54 | 0.34 |
| *Id.* *id.* | *Id.* | Mouillées d'eau. | 0.71 | 0.25 |
| *Id.* *id.* | Bout sur plat. | Sans enduit. | 0.43 | 0.19 |
| Chêne sur orme. | Parallèles. | *Id.* | 0.38 | » |
| Orme sur chêne. | *Id.* | *Id.* | 0.69 | 0.43 |
| *Id.* *id.* | *Id.* | Frottées de savon sec. | 0.41 | 0.25 |
| *Id.* *id.* | Perpendiculaires. | Sans enduit. | 0.57 | 0.45 |
| Frêne, sapin, hêtre, sorbier sur chêne. | Parallèles. | *Id.* | 0.53 | 0.36 à 0.40 |
| Fer sur chêne. | *Id.* | *Id.* | 0.62 | 0.62 |
| *Id.* *id.* | *Id.* | Mouillées d'eau. | 0.65 | 0.26 |
| *Id.* *id.* | *Id.* | Frottées de savon sec. | » | 0.21 |
| Fonte sur chêne. | *Id.* | Sans enduit. | » | 0.49 |
| *Id.* *id.* | *Id.* | Mouillées d'eau. | 0.65 | 0.22 |
| *Id.* *id.* | *Id.* | Frottées de savon sec. | » | 0.49 |
| Cuivre jaune sur chêne. | *Id.* | Sans enduit. | 0.62 | 0.62 |
| Fer sur orme. | *Id.* | *Id.* | » | 0.25 |
| Fonte sur orme. | *Id.* | *Id.* | » | 0.20 |
| Cuir tanné sur chêne. | Cuir à plat. | Sans enduit. | 0.61 | 0.30 à 0.35 |
| *Id.* *id.* | Cuir de champ. | *Id.* | 0.43 | 0.30 à 0.35 |
| *Id.* *id.* | *Id.* | Mouillées d'eau. | 0.79 | 0.29 |
| *Id.* *id.* | Cuir à plat. | *Id.* | » | 0.29 |
| Cuir noir corroyé ou courroie. sur une surface plane en chêne. | Parallèles. | Sans enduit. | 0.74 | 0.27 |
| *Id.* *id.* sur tambour en chêne. | Perpendiculaires. | *Id.* | 0.47 | » |
| Cuir tanné sur fonte et sur bronze. | A plat ou de champ. | *Id.* | » | 0.56 |
| *Id.* *id.* *id.* | *Id.* | Mouillées d'eau. | » | 0.36 |
| *Id.* *id.* *id.* | *Id.* | Onctueuses et eau. | » | 0.23 |
| *Id.* *id.* *id.* | *Id.* | Huilées. | » | 0.15 |
| Cuir de bœuf pour garniture de piston, sur fonte. | *Id.* | Mouillées d'eau. | 0.62 | » |
| *Id.* | *Id.* | Huile, suif, saindoux. | 0.12 | » |
| Cuir noir corroyé sur poulie en fonte. | Cuir à plat. | Sans enduit. | 0.28 | » |
| *Id.* *id.* | *Id.* | Mouillées d'eau. | 0.38 | » |
| Chanvre en brin ou en corde sur chêne. | Parallèles. | Sans enduit. | » | 0.52 |
| *Id.* | Perpendiculaires. | Mouillées d'eau. | » | 0.33 |
| Natte de chanvre sur chêne. | Parallèles. | Sans enduit. | 0.50 | » |
| *Id.* *id.* | *Id.* | Mouillées d'eau. | 0.87 | » |
| Chêne et orme sur fonte. | *Id.* | Sans enduit. | » | 0.38 |
| Poirier sauvage sur fonte. | *Id.* | *Id.* | » | 0.44 |

| INDICATION DES SURFACES FROTTANTES. | DISPOSITION des fibres. | ÉTAT des surfaces. | RAPPORT du frottement à la pression | |
|---|---|---|---|---|
| | | | au départ, après quelque temps de contact. | pendant le mouvement. |
| Fer sur fer. . . . . | » | Sans enduit. . . | » | » [1] |
| Fer sur fonte. . . . . | » | *Id.* . . . . . | 0.19 | 0.18[2] |
| Fer sur bronze. . . . . | » | *Id.* . . . . . | » | 0.18[2] |
| Fonte sur fonte. . . . . | » | *Id.* . . . . . | 16[a] | 0.15[2] |
| Fonte sur bronze. . . . . | » | *Id.* . . . . . | » | 0.15[2] |
| Bronze sur bronze. . . . . | » | *Id.* . . . . . | » | 0.20 |
| *Id.* sur fonte. . . . . | » | *Id.* . . . . . | » | 0.22 |
| *Id.* sur fer. . . . . | » | *Id.* . . . . . | » | 0.16[3] |
| Chêne, orme, poirier sauvage, fonte, fer, acier et bronze, glissant l'un sur l'autre ou sur eux-mêmes. . . . . | » | Lubréfiées à la manière ordinaire, de suif, d'huile, de saindoux ou de cambouis mou. . . | » | 0.07 à 0.08[4] |
| Les mêmes. *Id.* . . . . . | » | Légèrement onctueuses au toucher. . . . . | » | 0.15 |
| Chêne, orme, charme, fer, fonte et bronze, glissant deux à deux l'un sur l'autre. . . . . | » | Enduites de suif. | 0.10[b] | » |
| Les mêmes. *Id.* . . . . . | » | *Id.* d'huile ou de saindoux. . . . | 0.15[c] | » |
| Calcaire tendre, dit calcaire oolithique, bien dressé sur lui-même. . . . . | » | Sans enduit. . . | 0.74 | 0.64 |
| Calcaire dur, dit muschelkalk, bien dressé sur calcaire oolithique. . . . | » | *Id.* . . . . . | 0.75 | 0.67 |
| Brique ordinaire sur calcaire oolithique. . . . . | » | *Id.* . . . . . | 0.67 | 0.65 |
| Chêne sur calcaire oolithique. . . . . | Bois de bout. . . | *Id.* . . . . . | 0.63 | 0.38 |
| Fer forgé. *Id.* . . . . . | Parallèles. . . . | *Id.* . . . . . | 0.49 | 0.69 |
| Muschelkalk sur muschelkalk. . . . . | » | *Id.* . . . . . | 0.70 | 0.38 |
| Calcaire oolithique sur muschelkalk. . | » | *Id.* . . . . . | 0.75 | 0.65 |
| Brique ordinaire sur muschelkalk. . . | » | *Id.* . . . . . | 0.67 | 0.60 |
| Chêne sur muschelkalk. . . . . | Bois de bout. . . | *Id.* . . . . . | 0.64 | 0.38 |
| Fer forgé sur muschelkalk. . . . . | Parallèles. . . . | *Id.* . . . . . | 0.42 | 0.24 |
| *Id.* *id.* . . . . . | *Id.* . . . . . | Mouillées d'eau. | » | 0.30 |
| Calcaire oolithique sur calcaire oolithique. . . . . | » | Mortier de trois parties de sable fin et une partie de chaux hydraulique. . . . | 0.74[d] | » |

*a* les surfaces conservant quelque onctuosité ;
*b* lorsque le contact n'a pas duré assez longtemps pour exprimer l'enduit ;
*c* lorsque le contact a duré assez longtemps pour exprimer l'enduit, et ramener les surfaces à l'état onctueux ;
*d* après un contact de 10 à 15 minutes ;
1 les surfaces se rodant dès qu'il n'y a pas d'enduit ;
2 les surfaces conservant encore un peu d'onctuosité ;
3 les surfaces étant un peu onctueuses ;
4 lorsque l'enduit est sans cesse renouvelé et uniformément réparti, ce rapport peut s'abaisser jusqu'à 0,05.

**62.** Le tableau suivant, extrait de l'*Introduction à la mécanique industrielle* de M. Poncelet, complète le précédent.

*TABLEAU des résistances au glissement, à l'instant du départ et après quelque temps de contact.*

**PREMIÈRE PARTIE. — *Frottement proprement dit.***

| NATURE DES CORPS ET ENDUITS. | OPÉRATEURS. | RAPPORT du frottement à la pression. |
|---|---|---|
| Grès uni sur grès uni, à sec. . . . . | Rennie. | 0.71 |
| *Id.* *id.* avec mortier frais. . . . . | *Id.* | 0.66 |
| Calcaire dur poli sur calcaire dur poli. . . . . | Rondelet. | 0.58 |
| *Id.* bouchardé *id.* bouchardé. . . . . | Boistard. | 0.78 |
| Granit bien dressé sur granit bouchardé. . . . . | Rennie. | 0.66 |
| *Id.* avec mortier frais sur granit bouchardé. . . . | *Id.* | 0.49 |
| Caisse en bois sur pavé. . . . . | Règnier. | 0.58 |
| *Id.* sur la terre battue. . . . . | Hubert. | 0.33 |
| Pierre de libage sur un lit d'argile sèche. . . . . | Lesbros. | 0.54 |
| *Id.* l'argile étant humide et ramollie. . . . | *Id.* | 0.34 |
| *Id.* l'argile pareillement humide, mais recouverte de grosse grève. . . . . | *Id.* | 0.40 |

**DEUXIÈME PARTIE. — *Cohésion ou adhérence* (*).**

| NATURE des pièces superposées et de l'enduit. | OPÉRATEURS. | SURFACE en décimètres carrés. | JOURS de contact à l'air ou dans l'eau. | RÉSISTANCE moyenne par mètre carré. |
|---|---|---|---|---|
| *Calcaire bouchardé*, fiché sur calcaire bouchardé, avec mortier en chaux grasse et sable fin. . . . . | Boistard. | 1 à 2 | 17 à l'air. | 6 600 k. |
| | | 3 à 5 | *id.* | 9 400 |
| | | 47 | 48 à l'eau. | 1 200 |
| *Le même*, avec mortier en chaux grasse et ciment. . . . . | *Id.* | 1 à 2 | 17 à l'air. | 3 200 |
| | | 3 à 5 | *id.* | 5 300 |
| *Le même*, avec mortier en chaux grasse et ciment, non rompu. | *Id.* | 47 | 48 à l'eau. | 1 100 |
| Calcaire tendre de Jaumont, fiché sur calcaire tendre de Jaumont, avec mortier en chaux hydraulique de Metz et sable fin. . . . . | Morin. | 1 à 2 | 83 à l'air. | 18 000 |
| | | 2 à 3 | 48 *id.* | 12 000 |
| | | *Id.* | 43 *id.* | 10 100 |
| | | 4 à 6 | 48 *id.* | 10 000 |
| | | 7 à 8 | 48 *id.* | 9 400 |
| Briques ordinaires, fichées avec le même mortier. . . . . | *Id.* | 1.3 | 48 *id.* | 14 000 |
| | | 2.6 | 48 *id.* | 10 000 |
| Calcaire de Jaumont, fiché sur calcaire de Jaumont, avec plâtre ordinaire. . . . . | *Id.* | 2.0 | 48 *id.* | 22 000 |
| | | 8.0 | 48 *id.* | 28 000 |
| Calcaire bleu à gryphite très-lisse, sur calcaire bleu à gryphite très-lisse, avec plâtre. . | *Id.* | 2.5 | 48 *id.* | 11 000 |
| | | 4.5 | 48 *id.* | 20 000 |

(*) La rupture ayant lieu dans l'intérieur de la couche de mortier, ou à la jonction de la couche de plâtre avec les pierres, la résistance est due à la cohésion dans le premier cas, et à l'adhérence dans le second.

**63.** *TABLEAU des valeurs du coefficient de frottement des axes en mouvement sur leurs coussinets* (60).

1° D'APRÈS M. MORIN.

| INDICATION des | | NATURE DES ENDUITS. | RAPPORT du frottement à la pression. | |
|---|---|---|---|---|
| axes. | coussinets. | | Graissage ordinaire. | Graisg e continu. |
| Fonte. | Fonte. | Huile d'olive, saindoux, suif ou cambouis mou. | 0.07 à 0.08 | 0.054 |
| *Id.* | *Id.* | Les mêmes enduits, et les surfaces mouillées d'eau. | 0.08 | » |
| *Id.* | *Id.* | Asphalte. | 0.054 | » |
| *Id.* | *Id.* | Surfaces onctueuses. | 0.14 | » |
| *Id.* | *Id.* | Surfaces onctueuses et mouillées d'eau. | 0.14 | » |
| *Id,* | Bronze. | Huile d'olive, saindoux, suif ou cambouis mou. | 0.07 à 0.08 | 0.054 |
| *Id.* | *Id.* | Surfaces onctueuses. | 0.16 | » |
| *Id.* | *Id.* | Surfaces onctueuses et mouillées d'eau. | 0.16 | » |
| *Id.* | *Id.* | Surfaces très-peu onctueuses. | 0.19 | »[a] |
| *Id.* | Gayac. | Sans enduit. | 0.18 | »[b] |
| *Id.* | *Id.* | Huile ou saindoux. | » | 0.090 |
| *Id.* | *Id.* | Surfaces onctueuses d'huile ou de saindoux. | 0.10 | » |
| *Id.* | *Id.* | Surfaces onctueuses d'un mélange de saindoux et de plombagine. | 0.14 | » |
| Fer. | Fonte. | Huile d'olive, suif, saindoux ou cambouis mou. | 0.07 à 0.08 | 0.054 |
| *Id.* | Bronze. | Huile d'olive, saindoux ou suif. | 0.07 à 0.08 | 0.054 |
| *Id.* | *Id.* | Cambouis ferme. | 0.09 | » |
| *Id.* | *Id.* | Surfaces onctueuses et mouillées d'eau. | 0.19 | » |
| *Id.* | *Id.* | Surfaces très-peu onctueuses. | 0.25 | »[c] |
| *Id.* | Gayac. | Huile ou saindoux. | 0.11 | » |
| *Id.* | *Id.* | Surfaces onctueuses. | 0.19 | » |
| Bronze. | Bronze. | Huile. | 0.10 | » |
| *Id.* | *Id.* | Saindoux. | 0.09 | » |
| *Id.* | Fonte. | Huile ou suif. | » | 0.045 à 0.052 |
| Gayac. | *Id.* | Saindoux. | 0.12 | » |
| *Id.* | *Id.* | Surfaces onctueuses. | 0.15 | » |
| *Id.* | Gayac. | Saindoux. | » | 0.07 |

*a* Les surfaces commençant à se roder;
*b* Les bois étant un peu onctueux;
*c* Les surfaces commençant à se roder.

2° D'APRÈS COULOMB.

| INDICATION des axes. | INDICATION des coussinets. | NATURE DES ENDUITS. | RAPPORT du frottement à la pression. |
|---|---|---|---|
| Fer. | Cuivre. | Sans enduit. | 0.155 |
| *Id.* | *Id.* | Suif. | 0.085 |
| *Id.* | *Id.* | Saindoux. | 0.120 |
| *Id.* | *Id.* | Surfaces onctueuses de suif essuyé. | 0.127 |
| *Id.* | *Id.* | Huile d'olive. | 0.130 |
| *Id.* | *Id.* | Surfaces anciennement enduites de suif. | 0.133 |
| Chêne vert. | Gayac. | Suif. | 0.038 |
| *Id.* | *Id.* | Surfaces onctueuses de suif essuyé. | 0.060 |
| *Id.* | *Id.* | Surfaces anciennement enduites de suif. | 0.070 |
| *Id.* | Orme. | Suif. | 0.030 |
| *Id.* | *Id.* | Surfaces onctueuses de suif essuyé. | 0.050 |
| Buis. | Gayac. | Suif. | 0.043 |
| *Id.* | *Id.* | Surfaces onctueuses de suif essuyé. | 0.070 |
| *Id.* | Orme. | Suif. | 0.035 |
| *Id.* | *Id.* | Surfaces onctueuses de suif essuyé. | 0.050 |
| Fer. | Bois. | On ne désigne pas la nature des enduits. | 0.050 |

64. Les formules suivantes donnent successivement l'expression du travail absorbé par le frottement (28 et 60) : 1° d'un corps qui se meut sur une surface plane, pour un espace quelconque parcouru ; 2° d'un axe qui tourne dans un coussinet, pour une révolution (*Int.*, 1540) ; 3° de la face horizontale d'un pivot vertical tournant sur une crapaudine, aussi pour une révolution (*Int.*, 1541) ; 4° d'une couronne ou collet tournant en frottant par une face normale à son axe (*Int.*, 1542).

$$T = fPE, \quad T = fP \times 2\pi r, \quad T = fP \times \frac{4}{3}\pi r, \quad T = fP \times 2\pi\left(\rho + \frac{1}{12}\frac{l^2}{\rho}\right).$$

$T$ travail absorbé par le frottement ;
$f$ coefficient de frottement (60) ;
P pression qui s'exerce entre les deux surfaces frottantes ;
E espace parcouru par une surface sur l'autre ;
$r$ rayon du tourillon, de la face horizontale du pivot, et de l'extérieur de la couronne ;
$r'$ rayon intérieur de la couronne ;
$\rho = \frac{r + r'}{2}$ rayon moyen *id.*
$l = r - r'$ largeur de la couronne.

*Application.* Soit à déterminer, pour une révolution, le travail absorbé par le frottement du collet d'un arbre en fonte graissé d'huile, contre la joue latérale d'un coussinet en bronze ; la pression P du collet contre la joue du coussinet étant de 55 kilog., le grand rayon $r$ ayant $0^m,06$, et le petit $r'$, $0^m,05$.

On a $\rho = \frac{0{,}06 + 0{,}05}{2} = 0^m{,}055$, $l = 0{,}06 - 0{,}05 = 0^m{,}01$,

et, d'après le tableau (61) $f = 0{,}08$.

Remplaçant alors les lettres par leurs valeurs dans la formule 4°, on a

$$\mathcal{T} = 0{,}08 \times 55 \times 2 \times 3{,}14 \left(0{,}055 + \frac{1}{12} \times \frac{(0{,}01)^2}{0{,}055}\right) =$$

$$27{,}63\,(0{,}055 + 0{,}000015) = 1^{km}{,}52.$$

Supposant que l'arbre fasse une révolution par seconde, on voit que le travail absorbé par le frottement est à peu près le 1/4 de celui produit par un homme agissant sur une manivelle (37).

63. *Le frottement produit par la garniture d'un piston, et le travail absorbé par ce frottement pour un coup de piston* sont successivement :

$$F = \pi D e p f, \quad \text{et} \quad \mathcal{T} = \pi D e p f l,$$

F frottement ;
D diamètre du piston ;
$e$ hauteur de la garniture ;
$p$ pression sur un mètre carré de la surface de la partie frottante de la garniture ; c'est la pression du liquide ou du gaz comprimé sur la même unité de surface ;
$f$ coefficient de frottement ; il varie de 1/8 à 1/10 pour les garnitures de cuivre enduites sur fonte ; il est 1/6 pour les garnitures en chanvre ; et 1/5 pour celles en cuir enduites de plombagine ;
$\mathcal{T}$ travail absorbé par le frottement pour une course de piston ;
$l$ course du piston.

## CORDES ET COURROIES.

66. *Roideur des cordes.* Lorsqu'on vainc une résistance Q au moyen d'une corde qui s'enroule sur une poulie ou sur un tambour, la puissance P doit, pour l'équilibre dynamique, vaincre non-seulement la résistance Q et le frottement des tourillons, mais aussi une résistance due à la roideur de la corde, et dont l'effet consiste à infléchir la corde.

Appelant R cette résistance, ou mieux la force qui, d'après les expériences, agissant à très-peu près tangentiellement au cylindre sur lequel s'enroule la corde, fait équilibre à cette résistance, l'équilibre dynamique donnera, pour un tour de poulie, en négligeant les frottements et en appelant D le diamètre de la poulie et $d$ celui de la corde,

$$\mathcal{T}_m = P \times \pi(D + d) = Q \times \pi(D + d) + R \times \pi D, \quad \text{d'où} \quad P = Q + R\,\frac{D}{D + d}.$$

Coulomb a fait quelques expériences pour déterminer la valeur de R.

Navier, de la discussion des résultats obtenus par cet expérimentateur, a conclu l'expression suivante pour la valeur de R,

$$R = \frac{1}{D}(ad^{\mu} + bd^{\mu}Q); \qquad (a)$$

$ad^{\mu}$ quantité constante pour une même corde;
$bd^{\mu}Q$ quantité proportionnelle au poids élevé;
$\mu$ nombre qui varie avec l'usé de la corde.

Les expériences de Coulomb sont insuffisantes pour fixer la loi de variation de $\mu$; cependant Navier fait $\mu = 2$ pour les cordes neuves d'un grand diamètre, $\mu = 1{,}5$ pour les cordes plus qu'à demi usées, et $\mu = 1$ pour les ficelles très-petites et très-flexibles (*Int.*, 479).

Navier a admis (ce que ne confirme pas le tableau suivant dû aux expériences de Coulomb) que pour une même résistance utile Q, la résistance due à la roideur d'une corde blanche varie en raison inverse du diamètre de la poulie ou du tambour, et qu'elle est directement proportionnelle à la puissance $\mu$ du diamètre de la corde.

De cette hypothèse, il résulte que pour deux cordes de diamètres différents, s'enroulant sur deux poulies de diamètres inégaux, et élevant les mêmes poids, on a

$$R' = R\frac{D}{D'}\left(\frac{d'}{d}\right)^{\mu}; \qquad (b)$$

R' résistance due à la roideur de la corde de diamètre $d'$, s'enroulant sur la poulie dont le diamètre est D';
R résistance due à la roideur de la corde de diamètre $d$, s'enroulant sur la poulie dont le diamètre est D.

Pour les cordes goudronnées, la roideur ne varie pas sensiblement avec le degré d'usé, et il est plus exact de remplacer, dans la formule précédente, le rapport $\frac{d'^{\mu}}{d^{\mu}}$ par celui $\frac{n'}{n}$, $n'$ et $n$ exprimant les nombres de fils de caret que contiennent les deux cordes; ce qui donne

$$R' = R\frac{D}{D'} \times \frac{n'}{n}.$$

Pour les cordes blanches mouillées, Navier admet que la roideur constante $ad^{\mu}$ est double de celle des mêmes cordes sèches, mais que la roideur variable $bd^{\mu}$ est la même que pour ces dernières. Les expériences ne paraissent pas assez nombreuses pour conclure rien de général à cet égard.

*TABLEAU de la roideur de différentes cordes s'enroulant sur une poulie de 1 mètre de diamètre, calculée par Navier, d'après les expériences de Coulomb.*

| DÉSIGNATION des cordes. | NOMBRES de fils de caret. | DIAMÈTRES des cordes. | POIDS des cordes par mètre de longueur. | ROIDEUR constante $ad^{\mu}$. | ROIDEUR variable $bd^{\mu}$ par kilogr. de la charge Q. |
|---|---|---|---|---|---|
| | | m. | kilogr. | kilogr. | kilogr. |
| Corde blanche neuve.. | 30 | 0.0200 | 0.2834 | 0.22246 | 0.0097382 |
| *id.* . . . . . | 15 | 0.0144 | 0.1448 | 0.063514 | 0.0055182 |
| *id.* . . . . . | 6 | 0.0088 | 0.0522 | 0.0106038 | 0.0023804 |
| Corde goudronnée. . . | 30 | 0.0236 | 0.3326 | 0.3496 | 0.0125514 |
| *id.* . . . . . | 15 | 0.0168 | 0.1632 | 0.105928 | 0.0060592 |
| *id.* . . . . . | 6 | 0.0096 | 0.0693 | 0.021208 | 0.0025962 |

Ce tableau montre bien, comme nous l'avons fait remarquer, que les quantités $ad^{\mu}$ et $bd^{\mu}$ ne varient pas avec la grosseur de la corde suivant une même loi ($ad^{\mu}$ croît à peu près proportionnellement à la quatrième puissance du diamètre, et $bd^{\mu}$ à la deuxième puissance).

Il est donc impossible que l'expression (*a*) représente la résistance R; d'abord parce que les deux termes $ad^{\mu}$ et $bd^{\mu}$ ne varient pas proportionnellement à la même puissance du diamètre $d$; mais aussi parce qu'il arriverait qu'ayant $d = 1^{m}$, une corde usée donnerait la même résistance qu'une corde neuve, ce qui est inadmissible.

*Application.* A l'aide de ce tableau, et en admettant les formules précédentes, on peut résoudre tous les problèmes analogues au suivant:

*Quelle est la résistance due à la roideur d'une corde blanche neuve de* $0^{m},0254$ *de diamètre, s'enroulant sur une poulie de* $0^{m},40$ *de diamètre et élevant un poids de* 500 *kilogr.?*

La corde blanche neuve du tableau, dont le diamètre $0^{m},02$ s'approche le plus de $0^{m},0254$, donne, en remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule (*a*),

$$R = \frac{1}{0,40}(0,22246 + 0,0097382 \times 500) = 12^{k},73.$$

Alors, pour la corde de $0^{m},0254$ de diamètre placée dans les mêmes circonstances, on aura [formule (*b*)]

$$R' = 12,73\left(\frac{0,0254}{0,02}\right)^{2} = 20^{k},53.$$

**67.** M. Morin, reprenant la discussion des résultats de Coulomb, a conclu, en appelant A et B les deux quantités que Navier a représentées par $ad^{\mu}$ et $bd^{\mu}$:

1° Que pour les cordes en chanvre non goudronnées, dites *cordes*

*blanches*, sèches ou imbibées d'eau, en bon état, A et B varient à peu près proportionnellement au carré du diamètre de la corde ;

2° Que pour ces mêmes cordes à demi usées, A et B varient comme les puissances 1,5, c'est-à-dire comme les racines carrées des cubes des diamètres des cordes (*Int.*, 479) ;

3° Que pour les cordes goudronnées, B est proportionnel au nombre des fils de caret de la corde.

De cette discussion, M. Morin a conclu les formules suivantes, dans lesquelles $n$ désigne le nombre des fils de caret, et D le diamètre de la poulie :

1° Cordes blanches :

$$A = (0{,}000\,297 + 0{,}000\,245\,n)n \text{ et } B = 0{,}000\,363\,n,$$

d'où $$R = \frac{1}{D}[(0{,}000\,297 + 0{,}000\,245\,n)n + 0{,}000\,363\,nQ] \text{ kil.}$$

2° Cordes goudronnées :

$$A = (0{,}001\,4575 + 0{,}000\,346\,n)n \text{ et } B = 0{,}000\,4181\,n,$$

d'où $$R = \frac{1}{D}[(0{,}001\,4575 + 0{,}000\,346\,n)n + 0{,}000\,4181\,nQ] \text{ kil.}$$

M. Morin, en faisant usage de ces formules, a calculé les résultats du tableau suivant pour une poulie de 1 mètre de diamètre.

| NOMBRE DE FILS. | CORDES BLANCHES. | | | CORDES GOUDRONNÉES. | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Diamètre. | Roideur constante A. | Roideur variable B par kilogramme de la charge Q. | Diamètre. | Roideur constante A. | Roideur variable B par kilogramme de la charge Q. |
| | mètres. | kilogr. | kilogr. | mètres. | kilogr. | kilogr. |
| 6 | 0.008 9 | 0.010 603 8 | 0.002 178 | 0.010 5 | 0.024 201 | 0.002 512 992 |
| 9 | 0.011 0 | 0.022 520 7 | 0.003 267 | 0.012 9 | 0.041 143 | 0.003 769 488 |
| 12 | 0.012 7 | 0.038 847 6 | 0.004 356 | 0.014 9 | 0.067 314 | 0.005 025 984 |
| 15 | 0.014 1 | 0.059 584 5 | 0.005 445 | 0.016 7 | 0.097 742 | 0.006 282 480 |
| 18 | 0.015 5 | 0.084 731 4 | 0.006 534 | 0.018 3 | 0.138 339 | 0.007 538 976 |
| 21 | 0.016 8 | 0.114 288 3 | 0.007 623 | 0.019 8 | 0.183 193 | 0.008 795 472 |
| 24 | 0.017 9 | 0.148 255 2 | 0.008 712 | 0.021 1 | 0.234 276 | 0.010 051 968 |
| 27 | 0.019 0 | 0.186 632 1 | 0.009 801 | 0.022 4 | 0.291 586 | 0.011 308 464 |
| 30 | 0.020 0 | 0.229 419 0 | 0.010 890 | 0.023 6 | 0.355 125 | 0.012 564 963 |
| 33 | 0.021 0 | 0.276 615 9 | 0.011 979 | 0.024 7 | 0.424 891 | 0.013 821 456 |
| 36 | 0.022 0 | 0.328 222 8 | 0.013 068 | 0.025 8 | 0,500 886 | 0.015 077 952 |
| 39 | 0.022 8 | 0.384 239 7 | 0.014 157 | 0.026 8 | 0,583 108 | 0.016 334 448 |
| 42 | 0.023 7 | 0.444 666 6 | 0.015 246 | 0.027 9 | 0.671 558 | 0.017 590 944 |
| 45 | 0.024 6 | 0.509 503 5 | 0.016 335 | 0.028 9 | 0.766 237 | 0.018 847 440 |
| 48 | 0.025 4 | 0.578 750 4 | 0.017 424 | 0.029 8 | 0.867 144 | 0.020 103 936 |
| 51 | 0.026 1 | 0.652 407 3 | 0.018 513 | 0.030 8 | 0.974 278 | 0.021 360 432 |
| 54 | 0.026 8 | 0.730 474 2 | 0.019 602 | 0.031 6 | 1.087 641 | 0.022 616 928 |
| 57 | 0.027 6 | 0.812 951 1 | 0.020 691 | 0.032 6 | 1,207 231 | 0.023 873 424 |
| 60 | 0.028 3 | 0,899 838 0 | 0.021 780 | 0.033 4 | 1,333 050 | 0.025 129 920 |

*Application.* Soit à résoudre le même problème que page 44. Substituant les valeurs de A et B correspondant au diamètre $0^m,0254$ dans la formule

$$R = \frac{1}{D}(A + BQ),$$

on a, en remarquant que $n = 48$,

$$R = \frac{1}{0,40}(0,5787504 + 0,017424 \times 500) = 23^k,23,$$

au lieu de $20^k,53$ que nous avons trouvés en faisant usage de la table de Navier.

Pour un tour de poulie, le travail absorbé par cette résistance est

$$\mathcal{T}_n = \pi D \times 23^k,23 = 3,14 \times 0,40 \times 23,23 = 29^{km},18.$$

La puissance

$$P = Q + R\frac{D}{D+d} = 500 + 23,23\frac{0,40}{0,40+0,0254} = 521^k,84.$$

Le travail utile est, pour un tour de poulie,

$$\mathcal{T}_u = \pi(D + d) \times Q = 1,336 \times 500 = 668^{km},$$

et le travail moteur,

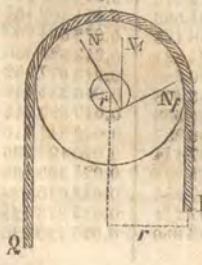
$$\mathcal{T}_m = P\pi(D + d) = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_n = 668 + 29,18 = 697^{km},18.$$

Dans la pratique il convient, quand cela est possible, de remplacer les cordes rondes par des cordes plates, qui ont plus de flexibilité et plus de durée.

On diminue beaucoup la roideur des cordes en les imprégnant d'un corps gras, ou en les frottant avec du savon.

68. *Équilibre dynamique de la poulie* (*Int.*, 1544).

Fig. 1.




Négligeant le poids de la poulie, le système est soumis à l'action de cinq forces :

P puissance ;
Q résistance ;
N réaction normale du support sur les tourillons ou l'œil de la poulie ;
$Nf$ frottement des tourillons (63). Ordinairement les surfaces frottantes n'étant qu'un peu onctueuses, il convient de faire $f = 0,15$ ;
$\frac{1}{D}(A + BQ)$ roideur de la corde (66 et 67).

Pour un tour de poulie, l'équilibre dynamique donne, en remarquant que le travail de la réaction normale est nul,

$$P2\pi r = Q2\pi r + Nf2\pi r' + \frac{\pi D}{D}(A + BQ).$$

Remarquant que la résultante $N_1$ des réactions N et $Nf$ est égale et directement opposée à la résultante de P et Q, cela permet d'éliminer N dans l'équation précédente, qui donne alors

$$P = Q + \frac{1}{2r}(A + BQ) + f_1 \frac{r'}{r}\sqrt{P^2 + Q^2 + 2PQ\cos\omega};$$

$$f_1 = \frac{f}{\sqrt{1 + f^2}}$$

$\omega$ angle que font entre eux les deux brins de la corde ou les deux forces P et Q.

Quand les deux forces P et Q sont parallèles, on a $\omega = 0$, $\cos\omega = 1$, et la formule précédente devient

$$P = \frac{1}{(r - f_1 r')}\left[\frac{1}{2}A + \left(r + \frac{1}{2}B + f_1 r'\right)Q\right]. \qquad (a)$$

Pour les données du n° 67, c'est-à-dire pour Q = 500 kil., un diamètre de poulie $D = 0^m,40$, et un diamètre de corde $d = 0^m,0254$, d'où $r = 0^m,2127$, supposant $r' = 0^m,01$, on a d'abord

$$f_1 = \frac{0,15}{\sqrt{1 + 0,15 \times 0,15}} = 0,1484.$$

et par suite

$$P = \frac{1}{0,2127 - 0,1484 \times 0,01}\left[\frac{0,5787504}{2} + (0,2127 + \frac{0,017424}{2} + 0,1484 \times 0,01)500\right] = 529^k.$$

*Remarque.* La formule (a) fait voir que la valeur de P se compose de deux parties : la première $\frac{A}{2(r - f_1 r')}$, qui est constante pour une même poulie et une même corde, et que l'on peut représenter par $\alpha$; la deuxième $\frac{(r + \frac{1}{2}B + f_1 r')Q}{r - f_1 r'}$, qui est proportionnelle à Q et que l'on peut représenter par $\beta Q$; ce qui permet de mettre la valeur de P sous la forme

$$P = \alpha + \beta Q.$$

69. *Équilibre dynamique de la mouffle ou du palan, en négligeant le poids de la corde et des poulies, le frottement latéral des poulies, et en supposant que les poulies ont même diamètre et que les cordes sont parallèles* (*Int.*, 1545).

Fig. 2.




Appelant :

P la puissance, c'est-à-dire la tension du cordon libre ou *garant*;
Q la résistance utile;
$t_1, t_2, t_3, \ldots t_n$, les tensions des divers cordons allant d'une chape à l'autre;
$n$ le nombre des cordons allant d'une chape à l'autre;
$\alpha$ et $\beta$ les fonctions déterminées comme à la remarque précédente.

On a (68)

$$t_2 = \alpha + \beta t_1$$
$$t_3 = \alpha + \beta t_2$$
$$\ldots\ldots\ldots$$

D'où il résulte qu'assignant une valeur arbitraire à $t_1$, on peut déterminer les valeurs correspondantes de $t_2$, $t_3 \ldots t_n$ et P; mais remarquant que l'on a $Q = t_1 + t_2 + \ldots t_n$, de ces diverses formules, on conclut la suivante, qui donne directement la valeur de P en fonction de Q,

$$P = \alpha\left(\frac{n\beta^n}{\beta^n - 1} - \frac{1}{\beta - 1}\right) + \frac{(\beta - 1)\beta^n}{\beta^n - 1} Q.$$

En négligeant toutes les résistances passives, on aurait

$$t_1 = t_2 = \ldots\ldots = t_n = P \quad \text{et} \quad Q = t_1 + t_2 + \ldots\ldots + t_n = nP.$$

Ainsi, la tension de chacun des cordons serait égale à la puissance P, et la résistance Q serait égale à la puissance P multipliée par le nombre $n$ des cordons allant d'une chape à l'autre.

La vitesse de Q est à celle de P dans le rapport $\frac{P}{Q} = \frac{P}{nP} = \frac{1}{n}$, c'est-à-dire que la vitesse de Q est égale à celle de P divisée par le nombre des cordons allant d'une chape à l'autre. Il est évident que, sauf l'allongement inégal des cordons sous des charges différentes, le rapport des vitesses de Q et de P est le même, que l'on tienne ou non compte des résistances passives.

*Application.* Quelle doit être la valeur de P pour soulever un poids de 500 kil., $D = 0^m,10$ étant le diamètre des poulies et $r' = 0^m,005$ le rayon de l'œil, le nombre des brins allant d'une chape à l'autre étant 6, comme dans la figure, et le diamètre $d$ de ces brins, $0^m,011$?

On a d'abord, en remarquant que $f_1 = 0{,}1484$ (68),

$$\alpha = \frac{0{,}0225207}{2(0{,}0555 - 0{,}1484 + 0{,}005)} = 0{,}20564,$$

$$\beta = \frac{\left(0{,}0555 + \frac{0{,}003267}{2} + 0{,}1484 \times 0{,}005\right)}{0{,}0555 - 0{,}1484 \times 0{,}005} = 1{,}0569.$$

Afin d'abréger les calculs, il convient de faire usage des logarithmes pour calculer $\beta^6$; on pose $log\,(\beta^6) = 6\,log\,\beta$, d'où on conclut $\beta^6 = 1{,}3747$.

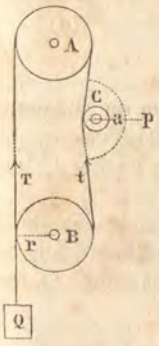
On a ensuite

$$P = 0{,}20564\left(\frac{6 \times 1{,}3747}{1{,}3747 - 1} - \frac{1}{1{,}0569 - 1}\right) + \frac{(1{,}0569 - 1)1{,}3747}{1{,}3747 - 1} \times 500 =$$
$$= 0{,}9127 + 0{,}20875 \times 500 = 105^{k},29,$$

au lieu de $P = \frac{500}{6} = 83^{k},33$, qu'on aurait eu si les résistances passives eussent été nulles.

**70.** *Frottement d'une corde ou d'une courroie sur un cylindre fixe.* La force T (*fig.* 3), capable de faire glisser une corde ou une courroie sur un cylindre fixe B, en la tirant par une de ses extrémités, cette corde ou cette courroie étant sollicitée à son autre extrémité par une force $t$, est donnée par la formule

Fig. 3.




$$T = t(e)^{\frac{fs}{r}},\ \text{d'où}\ (Int., 383)\ \log T = \log t + (\log e)\frac{fs}{r}.$$

T force qui produit le mouvement;
$t$ force qui s'oppose au mouvement;
$e = 2{,}718\,28$ base des logarithmes népériens (*Int.*, 384);
$\log e = 0{,}434\,29$, soit $0{,}4343$;
$f$ coefficient de frottement;
$s$ longueur en mètres de l'arc embrassé par la corde ou la courroie sur le rouleau;
$r$ rayon du rouleau.

D'après les expériences de M. Morin, les valeurs de $f$ sont :

0,47 pour des courroies à l'état ordinaire d'onctuosité sur des tambours en bois;
0,50 *id.* neuves *id.*
0,28 *id.* à l'état ordinaire d'onctuosité sur des poulies en fonte,
0,38 *id.* humides *id.*
0,50 pour des cordes de chanvre sur des poulies ou tambours en bois.

La formule fait voir que, pour une même valeur de $t$, T ne dépend pas seulement de $s$, mais bien de $\frac{s}{r}$, c'est-à-dire du nombre de degrés de l'arc embrassé; ainsi il est inutile d'augmenter démesurément le

diamètre des tambours dans l'unique but d'empêcher le glissement des courroies (tableau du n° 71).

**71.** *Transmission de mouvement au moyen d'une corde ou d'une courroie sans fin.* Quand, au moyen d'une corde ou d'une courroie sans fin, on transmet le mouvement d'une poulie A (*fig.* 3) à une autre poulie B, à l'extrémité du rayon de laquelle agit une résistance Q qui s'oppose au mouvement, on a, en appelant T la tension du brin conducteur, $t$ celle du brin conduit, et T′ la tension commune des deux brins en repos,

$$T' = \frac{T + t}{2}, \qquad (a)$$

et

$$T - t = Q. \qquad (b)$$

Pour que la courroie ne glisse pas sur la poulie B, il faut que son frottement sur cette poulie soit au moins égal à Q.

Ayant (70)

$$T = t(e)^{\frac{fs}{r}}, \qquad (c)$$

des équations $(b)$ et $(c)$ on conclut

$$t = \frac{Q}{(e)^{\frac{fs}{r}} - 1}. \qquad (d)$$

L'équation $(d)$ donne la valeur de $t$, qu'en pratique on augmente de 1/10, afin de s'assurer que la courroie ne glissera pas. Cette valeur, substituée dans l'équation $(b)$, fournit T, et les valeurs de T et $t$, substituées dans l'équation $(a)$, donnent T′.

*Application.* Supposons que la demi-circonférence de la poulie en fonte B (*fig.* 3) soit embrassée par une courroie de transmission qui donne $f = 0{,}28$ (70), et que l'on ait $r = 0^{m},30$ et Q = 50 kilog. La formule $(d)$ donne

$$t = \frac{Q}{(e)^{\frac{fs}{r}} - 1} = \frac{50}{(2{,}71828)^{\frac{0{,}28 \times 3{,}14 \times 0{,}30}{0{,}30}} - 1}$$

d'où (*Int.*, 383)

$$t = \frac{50}{2{,}41 - 1} = 35^{k},46.$$

Augmentant cette valeur de 1/10 pour s'assurer que la courroie ne glissera pas, on a $t = 39$ kilog.

La formule $(b)$ donne alors

$$T = t + Q = 39 + 50 = 89 \text{ kilog.},$$

et la formule (*a*),

$$T' = \frac{T+t}{2} = \frac{89+39}{2} = 64 \text{ kilog.}$$

Il est évident que ce calcul doit être fait pour la poulie qui donne la plus grande valeur de $t$; ainsi les deux poulies étant de même matière, on devra calculer $t$ pour celle qui est la plus petite, c'est-à-dire pour celle dont la portion de circonférence embrassée est la plus petite.

Le tableau suivant, que nous extrayons de l'*Aide-mémoire* de M. Morin, donne les valeurs de $(e)^{\frac{fs}{r}}$ pour différents rapports de l'arc embrassé à la circonférence entière; ce qui abrégera considérablement, pour ces rapports, le calcul de $t$, ainsi que celui de T dans les applications relatives au n° 70.

| RAPPORT de l'arc embrassé à la circonférence entière. | Valeurs de $(e)^{\frac{fs}{r}}$ pour des | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | courroies neuves sur des tambours en bois. | courroies à l'état ordinaire | | courroies humides sur des poulies en fonte. | cordes sur des tambours ou des treuils en bois | |
| | | sur des tambours en bois. | sur des poulies en fonte. | | brut. | poli. |
| 0.2 | 1.87 | 1.80 | 1.42 | 1.61 | 1.87 | 1.51 |
| 0.3 | 2.57 | 2.43 | 1.69 | 2.05 | 2.57 | 1.86 |
| 0.4 | 3.51 | 3.26 | 2.02 | 2.60 | 3.51 | 2.29 |
| 0.5 | 4.81 | 4.38 | 2.41 | 3.30 | 4.81 | 2.82 |
| 0.6 | 6.59 | 5.88 | 2.87 | 4,19 | 6.58 | 3.47 |
| 0.7 | 9.00 | 7.90 | 3.43 | 5.32 | 9.01 | 4.27 |
| 0.8 | 12.34 | 10.62 | 4.09 | 6.75 | 12.34 | 5.25 |
| 0.9 | 16.90 | 14.27 | 4.87 | 8.57 | 16.90 | 6.46 |
| 1.0 | 23.14 | 19.16 | 5.81 | 10.89 | 23.90 | 7.95 |
| 1.5 | » | » | » | » | 111.31 | 22.42 |
| 2.0 | » | » | » | » | 535.47 | 63.23 |
| 2.5 | » | » | » | » | 2575.80 | 178.52 |

72. *Rouleaux de tension.* Pour maintenir constante la tension des cordes ou des courroies sans fin, malgré leur allongement, on fait usage d'un rouleau de tension C (*fig.* 3), dont la pression sur la courroie est donnée par la formule

$$p = 2t' \cos \frac{1}{2} a \qquad (Int., 1372).$$

$p$ pression du rouleau sur la corde ou courroie, suivant la bissectrice de l'angle $a$ que font entre elles les deux parties du brin sur lequel il agit;

$t'$ tension des deux parties du brin sur lequel agit le rouleau; dans le cas de la figure 3, on a $t'=t$.

L'angle $a$, qui est toujours très-obtus, se mesure sur la courroie mise en place.

Supposant l'angle $a = 170°$ ou $\frac{1}{2}a = 85°$ dans l'exemple du n° 71, on a, en remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule précédente (*Int.*, 1011),

$$p = 2 \times 39 \times 0{,}08716 = 6^k{,}80.$$

*Remarque.* Afin que les courroies ne quittent pas les poulies sur lesquelles elles passent, il convient que les pourtours de ces poulies aient une convexité égale au 1/10 de leur largeur.

73. *Largeur des courroies.* On peut, sans craindre un allongement trop rapide des courroies de transmission de mouvement, leur faire subir un effort de 1/4 de kilogramme par millimètre carré de section; ce qui permettra de calculer leur largeur, connaissant l'épaisseur du cuir à employer.

Au moulin de M. Darblai, à Corbeil, le mouvement est communiqué à chaque meule à l'aide d'une courroie qui passe sur deux poulies de même diamètre, dont l'une est montée sur l'arbre de la meule. Dans les moulins à l'anglaise, les meules ont $1^m{,}30$ de diamètre, et leur vitesse de régime est de 120 révolutions par minute. Chez M. Darblai, les poulies motrices ont $1^m{,}30$ de diamètre comme les meules, et une largeur de $0^m{,}12$; elles sont tournées avec beaucoup de soin et légèrement bombées sur le pourtour, afin que la courroie ne glisse pas. Les courroies enveloppent ces poulies sur la moitié de leur circonférence; elles ont de $0^m{,}10$ à $0^m{,}11$ de largeur; elles sont en cuir de bonne qualité, bien corroyé; leur longueur est telle, qu'elles deviennent complétement lâches quand on soulève le rouleau de tension; ce qui fournit un moyen facile de débrayer et d'embrayer. Avec une telle vitesse de poulies, $3{,}14 \times 1{,}30 \times 2 = 8^m{,}16$ par seconde, les courroies n'ont pas besoin d'être fortement tendues; aussi, quoique le travail à transmettre peut s'élever quelquefois à plus de trois chevaux, le contre-poids adapté au levier des tendeurs est-il extrêmement faible.

Dans un travail présenté par M. Laborde à la Société industrielle de Mulhouse, cet ingénieur, avant de poser le principe sur lequel il base le calcul des largeurs à donner aux courroies, fait les observations suivantes :

1° La résistance à vaincre doit être moindre que la force qui ferait glisser la courroie sur la poulie;

2° La tension ne doit pas aller au point d'étendre le cuir;

3° La tension ne doit pas non plus augmenter inutilement le frottement sur les pivots ou les coussinets;

4° Une courroie doit être flexible, c'est-à-dire qu'elle doit se ployer facilement dans toutes ses parties.

Les trois premières conditions sont évidentes; quant à la quatrième, on en conclut qu'une courroie ne doit jamais être doublée, mais bien se composer seulement d'une seule épaisseur de cuir. L'auteur conseille, pour empêcher les courroies de se dessécher, de les graisser de temps à autre avec du suif pur ou mêlé de saindoux, ce qui se fait très-bien pendant la marche; cela les rend flexibles et en augmente la durée. L'expérience a montré que les poulies à surface lisse étaient préférables à celles qui seraient rayées dans un sens ou dans un autre, parce que les premières offrent un plus grand nombre de points de contact.

Après ces considérations, M. Laborde pose les principes suivants :

1° Les largeurs des courroies doivent être en raison directe des puissances à transmettre, la vitesse restant la même;

2° Les largeurs des courroies sont en raison inverse des vitesses avec lesquelles elles se meuvent, pour un même travail transmis.

D'où on conclut, $l$, $l'$ étant les largeurs de deux courroies, $f$, $f'$ les puissances transmises, et $v$, $v'$ les vitesses,

$$l : l' = \frac{f}{v} : \frac{f'}{v'}, \quad \text{d'où} \quad l' = l\frac{f'v}{fv'}.$$

M. Laborde a reconnu par expérience qu'une courroie de $0^m,081$ de largeur, marchant avec une vitesse de $162^m,50$ par minute, peut très-bien, avec une tension ordinaire, et sans se déformer, transmettre une force de 1 cheval-vapeur; cette courroie agissant sur des poulies non rayées, mais tournées lisses et d'égal diamètre, c'est-à-dire embrassées sur la moitié de leur circonférence. Partant de cette donnée, à l'aide de la formule précédente on peut déterminer la largeur à donner à une courroie marchant dans des conditions déterminées; ainsi, pour transmettre une puissance de 2 chevaux avec une vitesse de courroie de $112^m,50$, on devra prendre

$$l' = 0,081\,\frac{2 \times 162,50}{1 \times 112,50} = 0^m,234.$$

C'est en opérant ainsi que la table suivante a été calculée.

| Vitesse par minute en mètres. | Largeur des courroies en millimètres, pour des forces de 1/10 à 9/10 de cheval. | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 |
| 20 | 68 | 132 | 196 | 264 | 328 | 396 | » | » | » |
| 25 | 52 | 106 | 158 | 208 | 264 | 316 | 370 | 422 | » |
| 30 | 44 | 88 | 132 | 174 | 220 | 264 | 308 | 348 | 394 |
| 35 | 38 | 76 | 114 | 150 | 188 | 226 | 264 | 302 | 340 |
| 40 | 34 | 66 | 98 | 132 | 164 | 198 | 230 | 264 | 296 |
| 45 | 30 | 58 | 88 | 118 | 146 | 176 | 206 | 234 | 264 |
| 50 | 26 | 53 | 79 | 106 | 132 | 158 | 185 | 211 | 237 |
| 60 | 22 | 44 | 66 | 87 | 110 | 132 | 154 | 174 | 197 |
| 70 | 19 | 38 | 57 | 75 | 94 | 113 | 132 | 151 | 170 |
| 80 | 17 | 33 | 49 | 66 | 82 | 99 | 115 | 132 | 148 |
| 90 | 15 | 29 | 44 | 59 | 73 | 88 | 103 | 117 | 132 |
| 100 | 13 | 26 | 40 | 53 | 66 | 79 | 92 | 106 | 119 |
| 110 | 12 | 24 | 36 | 48 | 60 | 72 | 84 | 96 | 108 |
| 120 | 11 | 22 | 33 | 44 | 55 | 66 | 77 | 88 | 99 |
| 130 | 10 | 20 | 30 | 41 | 51 | 61 | 71 | 81 | 91 |
| 140 | 9 | 19 | 28 | 38 | 47 | 57 | 66 | 75 | 85 |
| 150 | 9 | 18 | 26 | 35 | 44 | 53 | 62 | 70 | 79 |
| 160 | 8 | 17 | 25 | 33 | 41 | 49 | 58 | 66 | 74 |
| 170 | 8 | 16 | 23 | 31 | 39 | 47 | 54 | 62 | 70 |
| 180 | » | 15 | 22 | 29 | 37 | 45 | 51 | 59 | 66 |
| 190 | » | 14 | 21 | 28 | 35 | 42 | 49 | 56 | 60 |
| 200 | » | 13 | 20 | 26 | 33 | 40 | 46 | 53 | 55 |
| 220 | » | 12 | 18 | 24 | 30 | 36 | 42 | 48 | 54 |
| 240 | » | 11 | 17 | 22 | 28 | 33 | 39 | 44 | 47 |
| 260 | » | 10 | 15 | 20 | 26 | 30 | 35 | 41 | 44 |
| 280 | » | 9 | 14 | 19 | 24 | 28 | 33 | 38 | 41 |
| 300 | » | 9 | 13 | 18 | 22 | 26 | 31 | 35 | 39 |
| 320 | » | 8 | 12 | 16 | 21 | 25 | 29 | 33 | 37 |
| 340 | » | 8 | 12 | 16 | 19 | 23 | 27 | 31 | 35 |
| 360 | » | » | 11 | 15 | 18 | 22 | 26 | 29 | 33 |
| 380 | » | » | 10 | 14 | 17 | 21 | 24 | 28 | 30 |
| 400 | » | » | 10 | 13 | 16 | 20 | 23 | 26 | 28 |
| 440 | » | » | 9 | 12 | 15 | 18 | 21 | 24 | 26 |
| 480 | » | » | 9 | 11 | 14 | 17 | 19 | 22 | 25 |
| 500 | » | » | » | 11 | 13 | 16 | 18 | 21 | 24 |

| Vitesse par minute en mètres. | Largeur des courroies en millimètres, pour des forces en chevaux de | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 60 | 220 | 440 | » | » | » | » | » | » | » | » |
| 70 | 188 | 377 | 565 | » | » | » | » | » | » | » |
| 80 | 165 | 329 | 494 | » | » | » | » | » | » | » |
| 90 | 147 | 293 | 440 | 586 | » | » | » | » | » | » |
| 100 | 132 | 264 | 396 | 528 | » | » | » | » | » | » |
| 110 | 120 | 240 | 360 | 480 | 600 | » | » | » | » | » |
| 120 | 110 | 220 | 330 | 440 | 550 | » | » | » | » | » |
| 130 | 101 | 203 | 304 | 406 | 507 | 608 | » | » | » | » |
| 140 | 94 | 188 | 283 | 377 | 471 | 565 | » | » | » | » |
| 150 | 88 | 176 | 264 | 352 | 440 | 527 | 615 | » | » | » |
| 160 | 82 | 165 | 247 | 329 | 412 | 494 | 576 | » | » | » |
| 170 | 78 | 155 | 233 | 310 | 388 | 466 | 543 | 621 | » | » |
| 180 | 73 | 147 | 220 | 293 | 367 | 440 | 512 | 586 | » | » |
| 190 | 69 | 139 | 208 | 278 | 347 | 416 | 486 | 555 | » | » |
| 200 | 66 | 132 | 198 | 264 | 330 | 396 | 462 | 528 | 594 | » |
| 220 | 60 | 120 | 180 | 240 | 300 | 360 | 420 | 480 | 540 | 600 |
| 240 | 55 | 110 | 165 | 220 | 275 | 330 | 385 | 440 | 495 | 550 |
| 260 | 51 | 101 | 152 | 203 | 254 | 304 | 355 | 406 | 457 | 507 |
| 280 | 47 | 94 | 141 | 188 | 236 | 283 | 330 | 377 | 424 | 474 |
| 300 | 44 | 88 | 132 | 176 | 220 | 264 | 308 | 352 | 396 | 440 |
| 320 | 41 | 82 | 124 | 165 | 206 | 247 | 288 | 330 | 371 | 412 |
| 340 | 39 | 80 | 116 | 155 | 194 | 233 | 272 | 310 | 349 | 388 |
| 360 | 37 | 73 | 110 | 146 | 183 | 220 | 256 | 293 | 329 | 366 |
| 380 | 35 | 69 | 104 | 139 | 174 | 208 | 243 | 278 | 313 | 347 |
| 400 | 33 | 66 | 99 | 132 | 165 | 193 | 231 | 264 | 297 | 330 |
| 440 | 30 | 60 | 90 | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 | 270 | 300 |
| 480 | 28 | 55 | 83 | 110 | 138 | 165 | 193 | 220 | 248 | 275 |
| 500 | 26 | 53 | 79 | 106 | 132 | 158 | 185 | 211 | 238 | 264 |
| 520 | 25 | 51 | 76 | 102 | 127 | 152 | 178 | 203 | 229 | 254 |
| 560 | 24 | 47 | 71 | 94 | 118 | 142 | 165 | 189 | 212 | 236 |
| 600 | 22 | 44 | 66 | 88 | 110 | 132 | 154 | 176 | 198 | 220 |
| 650 | 20 | 41 | 61 | 81 | 102 | 122 | 142 | 162 | 183 | 203 |
| 700 | » | 38 | 56 | 75 | 94 | 113 | 132 | 150 | 169 | 188 |
| 800 | » | 33 | 50 | 66 | 83 | 99 | 116 | 132 | 149 | 165 |
| 900 | » | 29 | 44 | 59 | 74 | 88 | 103 | 118 | 133 | 147 |
| 1000 | » | 26 | 40 | 53 | 66 | 79 | 92 | 106 | 119 | 132 |

Toutes choses égales d'ailleurs, il est évident que les largeurs du tableau précédent doivent être modifiées quand la courroie n'enveloppe pas la moitié de la poulie, puisqu'alors le frottement Q restant le même, la tension de la courroie doit varier.

Ayant déterminé les rapports de Q à $t$ pour différents arcs embrassés, rapports consignés dans la deuxième colonne du tableau suivant, et que l'on calcule à l'aide de la formule (71)

$$t = \frac{Q}{\frac{fs}{e^r} - 1}, \quad \text{d'où} \quad \frac{Q}{t} = e^{\frac{fs}{r}} - 1,$$

comme la largeur de la courroie varie proportionnellement à T, ou à $t$ qui lui est proportionnel, elle varie donc en sens inverse de la valeur du rapport $\frac{Q}{t}$. Ainsi, connaissant la largeur $l$ qu'il convient de donner à une courroie qui enveloppe, par exemple, la moitié d'une poulie, pour avoir la largeur $l'$ à donner à une courroie qui n'envelopperait pas la moitié d'une poulie de même nature, ayant même vitesse à la circonférence, et transmettant la même puissance, c'est-à-dire donnant le même frottement Q, on posera

$$l' : l = \left(\frac{fs}{e^r} - 1\right) : \left(\frac{fs'}{e^{rl}} - 1\right), \quad \text{d'où} \quad l' = l \frac{\frac{fs}{e^r} - 1}{\frac{fs'}{e^{rl}} - 1}.$$

Formule qui donnera $l'$, après avoir calculé séparément $\frac{fs}{e^r} - 1 = 1{,}41$ qui se rapporte à $l$, et $\frac{fs'}{e^{rl}} - 1$ qui se rapporte à $l'$.

Le tableau suivant donne, pour des poulies en fonte, les résultats de ces calculs pour les arcs embrassés consignés dans la première colonne.

| RAPPORT de l'arc embrassé à la circonférence entière. | VALEUR DE $\frac{fs'}{e^{rl}} - 1$ | VALEUR DE $\frac{1.41}{\frac{fs'}{e^{rl}} - 1}$ |
|---|---|---|
| 0.2 | 0.42 | 3.36 |
| 0.3 | 0.69 | 2.04 |
| 0.4 | 1.02 | 1.38 |
| 0.5 | 1.41 | 1.00 |
| 0.6 | 1.87 | 0.75 |
| 0.7 | 2.43 | 0.58 |
| 0.8 | 3.09 | 0.46 |
| 0.9 | 3.87 | 0.36 |
| 1.0 | 4.84 | 0.29 |

1re *Application.* Quelle est la largeur à donner à une courroie qui doit transmettre une puissance de 0,6 de cheval, la vitesse de la courroie étant de 80 mètres par minute, et la poulie étant enveloppée sur les 0,6 de sa circonférence?

Le tableau page 54 donnant $l = 0^m{,}099$ lorsque la poulie est enveloppée sur la moitié de la circonférence, cherchant dans la troisième colonne du tableau précédent le nombre qui correspond à l'arc 0,6, il en résulte que la largeur à donner à la courroie est

$$l' = 0^m{,}099 \times 0{,}75 = 0^m{,}074.$$

2e *Application.* Pour une puissance de quatre chevaux, une vitesse de courroie de 400 mèt., et un arc embrassé sur la petite poulie de 0,4, le tableau page 54 donne $l = 0^m,132$, et par suite on a

$$l' = 0,132 \times 1,38 = 0^m,182.$$

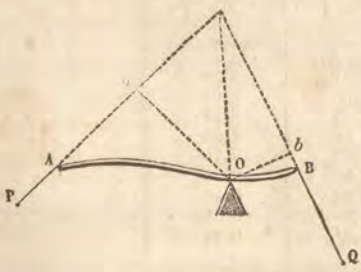
Tout ce qui précède suppose le cuir de bonne qualité, et d'une épaisseur ordinaire et uniforme ; mais il est évident que lorsqu'il s'agira de transmettre de faibles puissances avec de grandes vitesses, il conviendra de réduire l'épaisseur des courroies et d'augmenter leur largeur, afin d'obtenir la même résistance et plus de flexibilité ; alors on déterminera les dimensions de la section de la courroie d'après la règle donnée au commencement de ce numéro.

Des considérations semblables à celles qui viennent d'être exposées sur la largeur des courroies qui n'enveloppent pas la moitié de la circonférence, avaient déjà été données par M. Paul Heilmann (*Bulletin* n° 40, année 1835, de la Société industrielle de Mulhouse).

## MACHINES SIMPLES.

74. *Levier* (*Int.*, 1407 et suiv.). La perpendiculaire O$a$, abaissée d'un point O sur la direction d'une force P, est le *bras de levier* de cette force par rapport à ce point.

Fig. 4.




Le produit P $\times$ O$a$ de la force par son bras de levier est le *moment* de la force.

Le bras du levier d'une force par rapport à une droite est la perpendiculaire commune à la droite et à la direction de la force.

Le moment de la force par rapport à cette droite, appelée *axe des moments*, est le produit de la force par son bras de levier. Cette définition suppose la force située dans un plan normal à l'axe ; s'il n'en était pas ainsi, son moment serait le produit de son bras de levier par la projection de la force sur un plan perpendiculaire à l'axe.

Lorsque toutes les forces qui sollicitent un corps solide, qui ne peut que tourner autour d'un de ses points, sont situées dans un même plan avec ce point, il ne peut y avoir mouvement autour du point que dans le plan des forces. Un tel système constitue un *levier*, qui n'est ordinairement, dans la pratique, qu'une tige rigide mobile autour d'un petit

axe, qui est perpendiculaire au plan du mouvement et que l'on suppose réduit au point où il rencontre ce plan.

Un levier est sollicité par des forces qui tendent les unes à produire l'oscillation, et les autres à s'y opposer en agissant en sens contraire. Les premières de ces forces sont les *puissances* et les secondes les *résistances*.

Pour qu'un levier AB sollicité par une puissance P et une résistance Q soit en équilibre, on doit avoir, en négligeant le frottement de l'axe,

$$P : Q = Ob : Oa, \quad \text{d'où} \quad P \times Oa = Q \times Ob;$$

c'est-à-dire que les forces doivent être entre elles en raison inverse de leurs bras de levier, ou encore le moment de la puissance doit être égal au moment de la résistance.

L'équation précédente permet de calculer une des quatre quantités P, Q, $Oa$ et $Ob$, les trois autres étant données. Pour $P = 65^k$, $Oa = 2^m$ et $Ob = 1^m,10$, on a

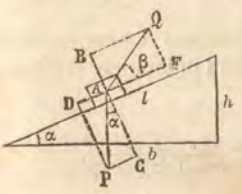
$$Q = P \times \frac{Oa}{Ob} = 65 \times \frac{2}{1,10} = 118^k,18.$$

La pression sur le point d'appui O, abstraction faite du poids du levier, est égale à la résultante des deux forces P et Q.

Un levier est dit du *premier genre* quand le point d'appui O est entre les points d'application de la puissance et de la résistance (*fig.* 4), et il est dit du *deuxième* ou du *troisième genre*, selon que le point d'application de la résistance est entre celui de la puissance et le point d'appui, ou que le point d'application de la puissance est entre celui de la résistance et le point d'appui.

75. *Plan incliné* (*Int.*, 1546).

Fig. 5.




*Le corps glissant par son propre poids*, pour qu'il y ait équilibre dynamique, on doit avoir

$$P \sin\alpha = fP\cos\alpha, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha} = tang\,\alpha.$$

P poids du mobile;
α angle que fait le plan incliné avec l'horizon;
$f$ coefficient de frottement (60).

Ainsi, il y aura équilibre dynamique lorsque la tangente de l'angle d'inclinaison du plan à l'horizon sera égale au coefficient de frottement $f$.

De là résulte un moyen de déterminer le coefficient de frottement de deux corps. Formant le plan incliné avec l'un des corps, et le mobile avec l'autre; puis inclinant doucement le plan incliné jusqu'à ce que le mobile soit prêt à se mettre en mouvement, c'est-à-dire jusqu'au

point où le mobile conserve le léger mouvement qu'on lui imprime, à ce point, le mobile est en équilibre dynamique, et la tangente de l'angle $\alpha$ que fait le plan avec l'horizon est égale au coefficient de frottement $f$.

Ayant trouvé $\alpha = 12°25'$, on a (*Int.*, 1011), $tang\,\alpha = f = 0{,}22$, valeur donnée par le bronze glissant sur la fonte sans enduit (61).

Pour $f = 0{,}08$, on a $tang\,\alpha = 0{,}08$, et par suite, $\alpha = 4°35'$.

*Si le mobile est sollicité, non-seulement par son poids, mais aussi par une ou plusieurs autres forces dont la résultante* Q *agit dans le plan vertical* PAE *passant par le centre de gravité du corps et la ligne de plus grande pente du plan incliné*, pour qu'il y ait équilibre dynamique, on doit avoir

$$P\sin\alpha = Q\cos\beta + f(P\cos\alpha - Q\sin\beta), \quad \text{d'où} \quad Q = P\frac{\sin\alpha - f\cos\alpha}{\cos\beta - f\sin\beta}. \qquad (1)$$

$\beta$ angle que fait la force Q avec la partie AE de la ligne de plus grande pente. Il faut donner à $\cos\beta$ un signe négatif quand l'angle $\beta$ est plus grand qu'un droit (*Int.*, 968).

*Si le mobile montait le plan incliné au lieu de le descendre*, on aurait, pour l'équilibre dynamique,

$$Q\cos\beta = P\sin\alpha + f(P\cos\alpha - Q\sin\beta), \quad \text{d'où} \quad Q = P\frac{\sin\alpha + f\cos\alpha}{\cos\beta + f\sin\beta}.$$

*Si la force* Q, au lieu d'agir de manière à tendre à soulever le mobile de dessus le plan incliné, comme nous l'avons supposé dans les deux formules précédentes et dans la figure, *agissait en dessous de* DE *de manière à presser le mobile sur le plan*, il suffirait simplement de remplacer le signe — de $Q\sin\beta$ par le signe + dans les deux formules précédentes.

*Dans le cas où l'angle $\alpha$ est nul, c'est-à-dire quand le plan est horizontal*, on a $\sin\alpha = 0$ et $\cos\alpha = 1$, $Q\cos\beta$ est seul puissance, et l'équation d'équilibre dynamique est

$$Q\cos\beta = f(P \pm Q\sin\beta), \quad \text{d'où} \quad Q = P\frac{f}{\cos\beta \pm f\sin\beta}.$$

*Si l'angle $\beta$ était nul, c'est-à-dire si* Q *agissait parallèlement au plan incliné*, on aurait $\sin\beta = 0$, $\cos\beta = \pm 1$, et l'équation (1) deviendrait

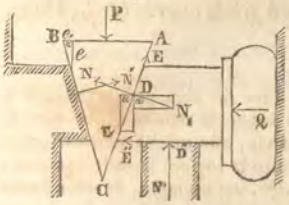
$$P\sin\alpha = \pm Q + fP\cos\alpha.$$

*Enfin, si à la fois les angles $\alpha$ et $\beta$ étaient nuls*, on aurait, pour l'équilibre dynamique,

$$Q = fP. \qquad (60)$$

**76.** *Équilibre dynamique de la presse à coin* (*Int.*, 1549).

Fig. 6.




Pour l'équilibre dynamique, on doit avoir

$$P = \frac{2(1 + f\,tang\,\alpha)}{tang\,\alpha - 2f - f^2\,tang\,\alpha}\,Q. \quad (a)$$

P force motrice agissant normalement à la tête du coin ;

Q résistance utile qu'oppose la matière à comprimer ;

$\alpha$ angle que fait la tête du coin avec chacune des faces travaillantes ;

$f$ coefficient de frottement (60), que l'on suppose être le même pour les deux faces travaillantes du coin et pour le bloc interposé entre le coin et la matière sur son support.

Pour $Q = 1000$ kil., $\alpha = 87° 10'$, d'où (*Int.*, 1011) $tang\,\alpha = 20{,}205\,553$, ou sensiblement 20,2, et $f = 0{,}16$, qui convient au chêne frotté de savon sec glissant sur chêne, les fibres étant parallèles (61), l'équation précédente donne

$$P = \frac{2(1 + 0{,}16 \times 20{,}2)}{20{,}2 - 2 \times 0{,}16 - 0{,}16 \times 0{,}16 \times 20{,}2} \times 1000 = 0{,}437 \times 1000 = 437^k.$$

Telle est la relation qui doit exister entre la puissance P et la résistance utile Q pour qu'il y ait équilibre dynamique, c'est-à-dire pour que le moindre effort mette la presse en mouvement, et que ce mouvement se conserve uniforme quand cet effort additionnel cesse son action. Il est évident qu'un tel mouvement ne peut se réaliser qu'autant que la résistance Q reste constante, ce qui n'a pas lieu quand on comprime des matières ; mais, dans toutes les positions, les valeurs de P et Q sont liées par la relation précédente.

L'application qui vient d'être faite montre que cette presse est peu avantageuse pour obtenir de grandes compressions, et qu'il ne convient guère de l'employer quand la force motrice n'est qu'une simple pression, et non le résultat d'un choc.

**77.** *Relation entre le travail moteur et le travail utile résistant.*

Pour un abaissement $e$ du coin, le bloc comprimant avançant de $2e'$, les travaux moteur et utile sont

$$P \times e \quad \text{et} \quad Q \times 2e'.$$

On a (*Int.*, 1000)

$$e = e'\,tang\,\alpha. \quad (b)$$

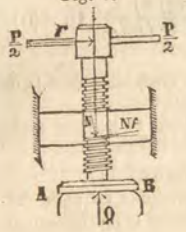
Multipliant membre à membre les équations $(a)$ et $(b)$, on obtient

$$Pe = \frac{tang\,\alpha + f\,tang^2\alpha}{tang\,\alpha - 2f - f^2\,tang\,\alpha}\,Q \times 2e'. \quad (c)$$

Formule donnant le travail moteur Pe en fonction du travail utile $Q \times 2e'$.

**78.** *Équilibre dynamique de la presse à vis à filets carrés* (*Int.*, 1554).

Fig. 7.




Appelant :

P la puissance agissant dans un plan perpendiculaire à l'axe. La force P est supposée répartie uniformément autour de l'axe de la vis, afin qu'elle ne fasse naître aucune pression contre la surface latérale des filets; ainsi elle est composée, par exemple, de deux forces $\frac{1}{2}$ P formant un couple dont le bras de levier est divisé en deux parties égales par l'axe;

$r$ le bras de levier de la puissance P;

$r'$ le rayon moyen de la surface hélicoïdale en contact;

$r''$ le rayon de la surface par laquelle le bout de la vis frotte sur AB;

$\alpha$ l'angle que fait l'hélice moyenne, ou mieux la tangente à cette hélice, avec le plan perpendiculaire à l'axe;

$h$ le pas de l'hélice (*Int.*, 1168); c'est l'espace parcouru suivant l'axe de la vis pour une révolution de cette vis, ou encore la distance d'axe en axe de deux filets consécutifs;

$f$ le coefficient de frottement, que l'on suppose être le même pour les filets et le bout de la vis;

Q la résistance utile que la matière oppose au mouvement de translation de la vis; elle agit suivant l'axe de la vis,

on a, pour l'équilibre dynamique,

$$P = Q\left(\frac{r'}{r} \times \frac{tang\,\alpha + f}{1 - f\,tang\,\alpha} + \frac{2}{3} f \frac{r''}{r}\right),$$

ou, en remplaçant $tang\,\alpha$ par son égal $\frac{h}{2\pi r'}$,

$$P = Q\left(\frac{r'}{r} \times \frac{h + 2\pi r' f}{2\pi r' - fh} + \frac{2}{3} f \frac{r''}{r}\right). \qquad (a)$$

*Dans le cas où on néglige le frottement du bout de la vis sur la surface* AB, ces formules deviennent respectivement

$$P = Q \frac{r'}{r} \times \frac{tang\,\alpha + f}{1 - f\,tang\,\alpha},$$

et

$$P = Q \frac{r'}{r} \times \frac{h + 2\pi r' f}{2\pi r' - fh}.$$

*Application.* Pour $Q = 9000$ kil., $r = 1^m,00$, $r' = 0^m,034$, $r'' = 0^m,025$, $h = 0^m,016$ et $f = 0,08$, la formule $(a)$ donne

$$P = 9000\left(\frac{0,034}{1} \times \frac{0,016 + 2 \times 3,14 \times 0,034 \times 0,08}{2 \times 3,14 \times 0,034 - 0,08 \times 0,016} + \frac{2 \times 0,025 \times 0,08}{3}\right) =$$
$$= 9000\,(0,005299 + 0,001333 = 9000 \times 0,006632 = 59^k,69;$$

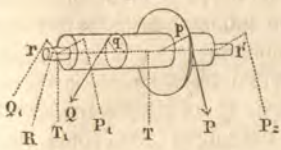
au lieu de

$$P = 9000 \times 0{,}005\,299 = 47^{k},69,$$

quand on ne tient pas compte du frottement du bout de la vis; ce frottement n'est donc pas négligeable.

**79.** *Treuil.* (*Int.*, n$^{os}$ 1418 et suivants). En négligeant les frottements des tourillons du treuil (*fig.* 8), on a, pour l'équilibre dynamique,

Fig. 8.




$$P \times 2\pi p = Q \times 2\pi q, \quad \text{d'où} \quad Pp = Qq.$$

P puissance ou force motrice agissant dans un plan normal à l'axe du treuil;

$p$ bras de levier de P, par rapport à l'axe du treuil;

Q résistance vaincue agissant dans un plan normal à l'axe du treuil;

$q$ bras de levier de Q, par rapport à l'axe du treuil.

Les forces P et Q peuvent ne pas être parallèles entre elles.

**80.** En tenant compte du frottement des tourillons du treuil, la formule précédente devient

$$Pp = Qq + fRr + fR'r'.$$

$f$ coefficient de frottement des tourillons sur leurs coussinets;

$r$ et $r'$ rayons des tourillons;

R et R' résultantes des composantes des trois forces : le poids du treuil, la puissance P et la résistance Q, décomposées chacune en deux autres agissant dans des plans normaux à l'axe, au milieu de la longueur des tourillons $r$ et $r'$ (*Int.*, 1365, 1390);

$fRr$ et $fR'r'$ moments des frottements des tourillons.

Comme R et R' dépendent de Q, on résoudra l'équation précédente par tâtonnement : on déterminera d'abord Q en négligeant le frottement des tourillons (79); ayant Q, on déterminera les valeurs correspondantes de R et R', par les décompositions indiquées plus haut et figure 8; ces valeurs, substituées dans l'équation précédente, donneront une deuxième valeur de Q plus exacte que la première. Opérant sur cette seconde valeur de Q comme pour la première, on obtiendra une troisième valeur s'approchant encore plus de la vérité, et en continuant ainsi de suite, on obtiendra pour Q une valeur aussi exacte qu'on voudra. Dans la pratique, on pourra généralement considérer la deuxième valeur de Q comme suffisamment approchée de la valeur réelle.

**81.** *Cabestan.* Si, outre les forces P et Q qui sollicitent le treuil en agissant dans des plans normaux à son axe, une force F agit parallèlement à cet axe, comme cela arrive dans les cabestans, qui ne sont autre chose que des treuils à axe vertical, dont le poids, au lieu de se reporter sur le contour des tourillons, agit sur la face horizontale du pivot inférieur, la formule posée pour le treuil (80) devient

$$Pp = Qq + fRr + fR'r' + f'F\frac{2}{3}r''.$$

$f'F\frac{2}{3}r''$ moment du frottement de la face horizontale du pivot (64);

$f'$ coefficient de frottement qui peut être différent de celui du pourtour du pivot;

$r''$ rayon de la surface frottante horizontale du pivot.

82. *Frottement des engrenages.* Lorsqu'un corps se meut en roulant et glissant à la fois sur un autre corps, on admet que le travail total absorbé par les deux frottements est le même que si un simple frottement de glissement avait lieu sur la différence des chemins parcourus réciproquement par une surface sur l'autre, et un simple frottement de roulement sur le plus petit des chemins parcourus (*Int.*, 1550). Dans les engrenages, les deux mouvements de roulement et de glissement sont réunis, et on trouve, en négligeant le frottement de roulement, qui est toujours très-faible (*Int.*, 1551),

$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_u \times \frac{fa}{2}\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right).$$

$\mathcal{T}_m$ travail moteur dépensé par la roue qui conduit;

$\mathcal{T}_u$ travail utile dont on peut disposer sur l'arbre de la roue conduite;

$\mathcal{T}_u \times \frac{fa}{2}\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r'}\right)$, travail absorbé par le frottement;

$f$ coefficient de frottement, variable suivant la nature des dents et la manière dont elles sont graissées (64);

$a$ pas de l'engrenage; c'est la distance d'axe en axe de deux dents consécutives, prise sur la circonférence primitive;

$r$ et $r'$ rayons des circonférences primitives des deux roues.

La formule précédente fait voir que pour des roues de rayons donnés le travail absorbé par le frottement est proportionnel au pas $a$, qu'il faut par conséquent prendre le plus petit possible. La même formule montre encore que pour les mêmes valeurs de $a$, $r$ et $r'$, le rapport entre le travail moteur et le travail utile est le même, quelle que soit la roue qui commande l'autre.

Pour les engrenages cylindriques, on peut mettre la formule précédente sous la forme plus commode

$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_u f\pi\left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n'}\right).$$

$n$ et $n'$ nombres de dents contenus dans les engrenages.

*Application.* On a $\mathcal{T}_m = 300^{km}$ par seconde, la roue motrice a 100 dents et le pignon 21, le graissage des dents est bien fait et donne $f = 0{,}08$; il s'agit de déterminer le travail utile $\mathcal{T}_u$ que pourra transmettre l'arbre du pignon dans une seconde.

Remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la dernière expression de $T_m$, on a

$$300 = T_u + T_u \times 0{,}08 \times 3{,}14 \left(\frac{1}{100} + \frac{1}{21}\right),$$

d'où l'on tire

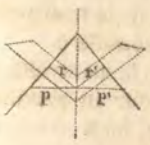
$$T_u = \frac{300}{1 + 0{,}0145} = 295^{km},71.$$

Le travail absorbé par le frottement en une seconde est égal à

$$T_m - T_u = 300 - 295.71 = 4^{km},29.$$

83. Pour les *engrenages coniques*, on fait usage de la première formule (82); seulement, au lieu de prendre pour $r$ et $r'$ les rayons des engrenages, on prend les perpendiculaires à la génératrice de contact, prolongées jusqu'aux axes des engrenages; ainsi $p$ et $p'$ étant ces perpendiculaires (*fig.* 9), on a

Fig. 9.




$$T_m = T_u + T_u \frac{fa}{2} \left(\frac{1}{p} + \frac{1}{p'}\right).$$

84. Pour une crémaillère commandée par une roue d'engrenage ou commandant une roue d'engrenage, on a (*Int.*, 1552),

$$T_m = T_u + T_u \frac{fa}{2} \times \frac{1}{r}.$$

$a$ pas de l'engrenage et de la crémaillère;
$r$ rayon de la circonférence primitive de l'engrenage.

85. Suivant que les engrenages métalliques sont exécutés avec plus ou moins de soin, l'intervalle entre deux dents consécutives est égal à l'épaisseur de la dent, augmentée de 1/20 à 1/10 de cette épaisseur, c'est-à-dire qu'il y a de 1/20 à 1/10 de jeu entre les dents engrenées; ce jeu varie de 1/10 à 1/6 pour les engrenages à dents de bois.

Pour rendre le frottement des engrenages le plus petit possible, on fait les surfaces de contact en épicycloïde ou en développante de cercle (*Int.*, 1144, 1160); mais, à cause des difficultés d'exécution, pour les engrenages ordinaires, on se contente d'arcs de cercle décrits avec le pas de l'engrenage pour rayon, et d'un centre pris sur la circonférence primitive ou de contact; des constructeurs prennent les 3/4 du pas pour rayon. Le reste des joues de chaque dent est un plan tangent à ces arcs et passant par le centre de la roue. C'est surtout pour les petits pignons à grosses dents s'engrenant avec de grandes roues, qu'il faut avoir recours aux tracés en développantes ou en épicycloïdes.

Pour les engrenages coniques, il faudrait prendre des développantes

ou des épicycloïdes sphériques; mais on se contente également d'arcs de cercle. (Voir la résistance des matériaux pour les dimensions des différentes parties des roues d'engrenage.)

**86.** *Travail absorbé par le frottement du bouton d'une manivelle.* Pour obtenir ce travail, on développe la circonférence du bouton de la manivelle, et on élève aux différents points de ce développement, que l'on considère comme axe des abscisses, des perpendiculaires ou ordonnées représentant l'intensité du frottement correspondant à ces différents points; l'aire de la courbe ainsi obtenue, que l'on peut calculer à l'aide de la formule de Thomas Simpson ou de celle de M. Poncelet, représente le travail absorbé par le frottement pour une révolution (*Int.*, 1178 et 1179).

L'intensité du frottement correspondant à un point quelconque de l'axe des abscisses est représentée par le coefficient de frottement multiplié par la pression qu'exerce la bielle sur le bouton de la manivelle, au moment où son axe rencontre ce bouton au point considéré.

Si la bielle exerce un effort constant sur le bouton de la manivelle, le travail absorbé par le frottement est le même que pour un tourillon ordinaire (64), et, pour une révolution de la manivelle, on a

$$T_n = 2\pi r f \mathrm{P}.$$

$T_n$ travail absorbé;
$r$ rayon du bouton de la manivelle;
$f$ coefficient de frottement;
P pression constante de la bielle sur le bouton de la manivelle.

Cette formule fait voir que le travail absorbé est proportionnel au rayon $r$, qu'il faudra par conséquent prendre le plus petit possible. Aussi doit-on éviter l'emploi des excentriques pour la transmission des grands efforts, l'expression du travail absorbé par le frottement étant la même que pour le bouton d'une manivelle, et $r$ étant très-grand, puisque c'est le rayon de figure de l'excentrique.

**87.** Une *manivelle* peut être *à double effet* ou *à simple effet*. Dans le premier cas, qui est celui supposé formule n° 86, la force qui agit sur la bielle est dirigée dans un sens pendant la première moitié de la révolution de la manivelle, et dans l'autre sens pendant la seconde moitié. Dans le deuxième cas, la force n'agit que dans un sens et ne sollicite la manivelle que pendant la moitié de sa révolution; de telle sorte que le travail absorbé par le frottement, pour une révolution complète de la manivelle, n'est que

$$\pi r f \mathrm{P}.$$

**88.** *Équilibre dynamique d'une manivelle à double effet.* Cet équilibre ne peut être que périodique (49), et on doit avoir, pour une période ou un tour de manivelle, en négligeant les frottements,

$$Q \times 2\pi R = F \times 4R, \quad \text{d'où} \quad Q = \frac{2}{\pi} F.$$

Q résistance agissant sur l'arbre de la manivelle à l'extrémité d'un bras de levier que l'on suppose égal au rayon de la manivelle ;
R rayon de la manivelle ;
$2\pi R$ chemin parcouru par la résistance Q pour un tour de manivelle ;
$Q \times 2\pi R$ travail absorbé par la résistance Q, aussi pour un tour de manivelle ;
F force agissant sur l'axe de la bielle, que l'on suppose assez long pour qu'on puisse le considérer comme restant toujours parallèle à lui-même, et négliger sa variation de direction ;
$4R$ espace parcouru par la puissance F pour un tour de manivelle, c'est-à-dire pour une allée et une venue de la bielle ;
$F \times 4R$ travail développé par la puissance F, aussi pour un tour de manivelle ou une allée et une venue de la bielle.

Pendant chaque demi-révolution de la manivelle, le moment de la puissance F, par rapport à l'axe de la manivelle, varie pour toutes les positions de la bielle, et les valeurs minimum, moyenne et maximum de ce moment, valeurs qui sont les mêmes pour un tour entier de manivelle, sont respectivement :

$$F \times 0, \quad F \times \frac{2}{\pi} R, \quad F \times R ;$$

quantités qui sont dans le rapport des nombres :

$$0, \qquad 0.637, \qquad 1,$$

ou

$$0, \qquad 1, \qquad 1.57.$$

La grande différence de ces nombres proportionnels fait voir combien la marche d'une manivelle est irrégulière.

89. *Équilibre dynamique de deux manivelles à double effet montées à angle droit sur le même arbre.* Chaque manivelle agit en particulier comme dans le cas précédent, et leur ensemble ne peut encore donner qu'un équilibre dynamique périodique, pour lequel on doit avoir, pour un tour des manivelles et en négligeant les frottements,

$$Q \times 2\pi R = 2F \times 4R, \quad \text{d'où} \quad Q = \frac{2}{\pi} \times 2F.$$

Q et R ont les mêmes significations que dans le cas précédent ;
F force qui agit suivant l'axe de chacune des bielles.

Les sommes de moments minimum, moyenne et maximum des forces F, pour une révolution des manivelles, sont successivement :

$$F \times R, \quad 2F \times \frac{2}{\pi} R, \quad 2F \times \frac{R}{\sqrt{2}} ;$$

valeurs qui sont dans le rapport des nombres :

1, 1.274, 1.414,

ou

0.783, 1, 1.107.

90. *Équilibre dynamique de trois manivelles à double effet montées sur le même arbre et faisant entre elles des angles égaux.* Cet équilibre ne peut encore être que périodique, et on doit avoir, pour une période, en négligeant les frottements,

$$Q \times 2\pi R = 3F \times 4R, \quad \text{d'où} \quad Q = \frac{2}{\pi} \times 3F.$$

Les lettres ont les mêmes significations que dans le cas précédent, et les sommes de moments minimum, moyenne et maximum des forces F, pour une révolution des manivelles, sont successivement :

$$FR\sqrt{3}, \quad 3F\frac{2}{\pi}R, \quad 2FR;$$

valeurs qui sont dans le rapport des nombres :

1.73, 1.91, 2,

ou

0.905, 1, 1.046.

En employant 5, 7, 11..... manivelles convenablement disposées, on augmenterait encore la régularité du mouvement; mais les grandes difficultés d'ajustage et les complications du mécanisme font renoncer à l'emploi de plus de trois manivelles montées sur le même arbre.

91. *Équilibre dynamique d'une manivelle à simple effet* (87). Cet équilibre est encore périodique, et on doit avoir, pour une révolution complète de la manivelle, en négligeant les frottements,

$$Q \times 2\pi R = F \times 2R, \quad \text{d'où} \quad Q = \frac{F}{\pi}.$$

Cela suppose que la résistance Q agit, comme pour une manivelle à double effet, pendant la révolution complète.

Les moments, minimum, moyen et maximum de la force, pour une révolution complète de la manivelle, sont successivement :

$$F \times 0, \quad F \times \frac{R}{\pi}, \quad F \times R;$$

valeurs qui sont dans le rapport des nombres :

0, 0.318, 1,

ou

0, 1, 3.14.

92. *Bielle.* Pour qu'une bielle transmette le plus convenablement

possible, à une manivelle, l'effort qui la sollicite, il faut que sa longueur soit la plus grande possible; mais, afin de ne pas être obligé de lui donner une section trop considérable, on se contente de faire sa longueur égale à 5 ou 6 fois le rayon de manivelle.

93. *Volant pour une manivelle à simple effet et à double effet.* Afin de rendre possible la marche d'une manivelle, et de régulariser plus ou moins son mouvement, on fait usage d'un volant qui accumule l'excès du travail moteur sur le travail résistant quand ce premier est supérieur au second, pour le restituer quand le travail résistant devient supérieur au travail moteur (*Int.*, 1489).

Pour une manivelle à simple effet, le poids du volant est donné par la formule

$$PV^2 = 0.5511 \times F2R \times gK, \qquad (a)$$

de laquelle on conclut

$$P = \frac{24324n}{mV^2} K. \qquad (b)$$

Pour une manivelle à double effet, on a

$$PV^2 = 0.2105 \times F2R \times gK, \qquad (c)$$

d'où

$$P = \frac{4645n}{mV^2} K. \qquad (d)$$

P Poids du volant ou plutôt de sa jante, car on néglige la régularité due aux bras et au moyeu dans l'établissement de ces formules;
V vitesse moyenne de la jante du volant;
F force agissant suivant l'axe de la bielle;
R rayon de la manivelle;
$n$ puissance de la force F en chevaux;
$m$ nombre de tours du volant par minute;
K coefficient de régularité du mouvement; sa valeur dépend du genre de travail à produire.

Pour une manivelle à simple effet, on conclut (91)

$$n \times 75^{km} = \frac{F \times 2R}{60} m,$$

et pour une manivelle à double effet (88),

$$n \times 75^{km} = \frac{F \times 4R}{60} m.$$

C'est à l'aide de ces relations que l'on passe des formules (*a*) et (*c*) à celles (*b*) et (*d*).

Pour deux manivelles à double effet montées à angle droit sur le même arbre, la formule (*d*) devient

$$P = \frac{468n}{mV^2} K.$$

Pour les machines à vapeur à basse pression, Watt fait, dans les cas ordinaires de la pratique, K = 32 ; ce coefficient varie de 35 à 40 quand les machines commandent des filatures où l'on fabrique les *numéros* 40 à 60, et de 50 à 60 pour des filatures à *numéros* très-fins (voir la 3e partie).

Le *numéro* d'un fil de coton est le nombre d'écheveaux de 1000 mètres pesant ensemble un demi-kilogramme. Ainsi le demi-kilogramme du numéro 50 contient 50 écheveaux.

K atteint parfois la valeur 25 pour des machines ou des usines qui n'ont pas besoin d'une grande régularité de mouvement, comme des scieries, des moulins à blé, des pompes, etc, et il atteint même 20 pour des marteaux de forge (119).

L'examen des formules précédentes fait voir que le poids du volant est d'autant plus petit que la vitesse de la jante est plus grande. L'expérience prouve que cette vitesse peut atteindre 25 à 30 mètres par seconde, mais qu'il est dangereux de dépasser cette limite.

Le rayon du volant est ordinairement égal à 5 ou 6 fois celui de la manivelle.

*Application.* En appliquant la formule (*d*) à une machine à basse pression, de la force de 40 chevaux, faisant marcher la filature de Logelbach, près Colmar, on trouve, pour le poids de la jante du volant, 9320 kilog., au lieu de 9450 kilog., comme l'avaient adopté les constructeurs MM. Watt et Boulton.

Le diamètre moyen de la jante est de $6^m,10$, et le nombre de tours du volant, 19 par minute, ce qui donne une vitesse de $6^m,06$ par seconde. Les numéros des fils de coton varient de 40 à 60, ce qui a fait adopter 35 pour la valeur de K.

94. *Volant pour une manivelle à simple effet et à contre-poids.* Si, sur le prolongement d'une manivelle, au delà de son centre de rotation, on place un contre-poids tel, que le travail qu'il absorbera en s'élevant et restituera en descendant soit moitié de celui que produit la force motrice pour la 1/2 révolution pendant laquelle elle agit, cette manivelle agira comme une manivelle à double effet, et le poids du volant sera donné par la formule

$$PV^2 + Qv^2 = \frac{4645n}{m} K.$$

P, V, *n*, *m*, K, ont les mêmes significations qu'au numéro précédent;
Q poids du contre-poids;
*v* vitesse moyenne du centre de gravité du contre-poids.

*Remarque.* Les formules des nos 93 et 94 s'appliquent encore au cas où le volant n'est pas placé sur l'arbre même de la manivelle, pourvu que *m* exprime toujours le nombre de tours de la manivelle par minute, tandis que V et *v* expriment les vitesses de la jante du volant et du contre-poids ; mais, dans la pratique, il faut toujours placer le volant sur l'arbre des organes qui rendent irrégulière la transmission ou l'absorption du travail moteur, et le plus près possible de ces organes.

**95.** *Équilibre dynamique de l'excentrique.* Dans une transmission de mouvement au moyen d'un excentrique, l'équilibre est périodique, et on doit avoir

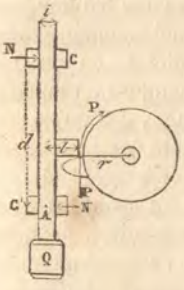
$$P \times 2\pi R = 4Fd + fF \times 2\pi r.$$

P puissance qui agit sur l'arbre de l'excentrique ;
R bras de levier de la puissance ;
F résistance appliquée à la bielle que met en mouvement l'excentrique ;
$d$ distance du centre de rotation au centre de figure de l'excentrique, ou 1/2 espace parcouru par la résistance pour une demi-révolution de l'excentrique ;
$f$ coefficient du frottement au pourtour de l'excentrique ;
$r$ rayon de figure de l'excentrique ;
$P \times 2\pi R$ travail dépensé par la puissance pour une révolution de l'excentrique ;
$4Fd$ travail utile produit *id.*
$fF \times 2\pi r$ travail absorbé par le frottement *id.*

L'excentrique présente les mêmes irrégularités de mouvement que la manivelle (88, 89, 90, 91).

**96.** *Équilibre dynamique du pilon* (*Int.*, 1553). Supposant que la puissance agit verticalement sous le mentonnet, pendant toute la course d'un pilon guidé par deux prisons, pour qu'il y ait équilibre dynamique, on doit avoir, pour chaque levée,

Fig. 10.




$$T_m \text{ ou } Ph = Qh\,\frac{d}{d-2lf} \qquad (a)$$

P force motrice agissant verticalement à l'extrémité du mentonnet ;
$h$ levée du pilon ;
$Ph$ travail moteur dépensé par levée du pilon ;
Q poids du pilon et de sa tige ;
$Qh$ travail utile produit ;
$d$ distance d'axe en axe des deux prisons ou guides ;
$l$ longueur du mentonnet ou distance du point d'application de la puissance à l'axe de la tige ;
$i$ épaisseur de la tige dans le sens de $l$ ;
$f$ coefficient de frottement de la tige sur ses guides.

La formule précédente fait voir que le travail utile $Qh$ est d'autant plus petit pour un même travail moteur $Ph$, que $l$ est plus grand, et que si l'on suppose $l = 0$, c'est-à-dire que la force P est appliquée à l'axe de la tige et agit suivant cet axe, on a

$$Ph = Qh.$$

Ce qui montre que le travail utile est alors égal au travail moteur, et que par conséquent le frottement contre les prisons est nul.

*Quand le pilon est soulevé par une came*, comme cela a lieu ordinairement, le travail absorbé par le frottement de la came sous le mentonnet est analogue à celui absorbé par le frottement d'un pignon

s'engrenant avec une crémaillère (84) ; seulement le pas $a$ est remplacé par $h$. En tenant compte de ce frottement, et en supposant que son coefficient est le même que pour les prisons, la formule ($\alpha$) devient

$$\mathbf{T}_m = \mathrm{Q}h\,\frac{d(2r+fh)}{2r(d-2lf+f^3i)}.$$

$n$ étant le nombre des coups de pilon donnés pendant une révolution de l'arbre à cames, et P la force motrice tangentielle qui agit à l'extrémité du rayon $r$, on doit avoir, pour l'équilibre dynamique,

$$n\mathbf{T}_m = 2\pi r\mathrm{P},$$

d'où

$$\mathrm{P} = \frac{n\mathbf{T}_m}{2\pi r} = n\mathrm{Q}h\,\frac{d(2r+fh)}{4\pi r^2(d-2lf+f^3i)}.$$

Les cames se font en développante du cercle (*Int.*, 1144).

La durée totale d'un coup de pilon se compose du temps $t$ que met la came à élever le pilon à la hauteur $h$, de celui $t' = \sqrt{2gh}$ de la descente du pilon, et de 1/10 à 1/6 de $t + t'$ pour le temps employé par le pilon à agir sur la matière, qui peut être plus ou moins compressible.

**97.** *Choc des corps solides.* Quand deux corps solides, en vertu de vitesses acquises sous l'influence de causes quelconques, tendent à occuper au même instant une même partie de l'espace, dès qu'ils arrivent à être ce qu'on appelle en contact, il se déclare des actions mutuelles répulsives qui atteignent un degré suffisant d'intensité pour modifier en grandeur ou en direction, ou à la fois en grandeur et en direction, les vitesses primitives des deux corps, de manière que ceux-ci ne viennent pas occuper la même portion de l'espace au même instant, et par là satisfont à la loi générale de l'*impénétrabilité de la matière* (*Int.*, 1381 et suivants).

Lorsque deux corps se rapprochent ainsi de manière à donner naissance à ces actions mutuelles par leurs changements plus ou moins sensibles de forme, on dit qu'il y a *choc* ou *collision* entre les deux corps.

*Le choc de deux corps n'influe en rien sur le mouvement du centre de gravité du système*, mouvement qui ne dépend en intensité et en direction que des forces extérieures (*Int.*, 1488).

**98.** *Vitesse du centre de gravité de l'ensemble de deux corps solides après leur choc* (*Int.*, 1525).

*Supposons le cas le plus simple, celui où les centres de gravité des deux corps se meuvent suivant une même droite par rapport à laquelle les deux corps sont symétriques.* C'est à ce cas que l'on ramène les applications pratiques sur le choc.

Le centre de gravité de l'ensemble se mouvra sur la droite suivie par les deux corps, comme si le choc n'avait pas lieu ; de plus, il est évident que la vitesse de chacun des corps en particulier ne changera

pas de direction, mais bien d'intensité, et même l'une pourra changer de signe.

Soient $m$ et $m'$ les masses des deux corps, $v$ et $v'$ leurs vitesses respectives avant le choc, et $u$ la vitesse du centre de gravité.

Dès que le choc commence, les actions mutuelles égales agissent en sens contraire sur chacun des deux mobiles, et produisent des changements de formes et des vibrations qui dépendent de la nature et de la forme des corps.

Si la vitesse relative des deux corps l'un par rapport à l'autre est faible, et que les corps aient une certaine consistance, on peut admettre que le changement de forme pendant le choc s'étend à peu de distance du point de contact, et que les vibrations des molécules sont très-faibles; d'où il résulte que le mouvement de toutes les molécules de chacun des corps peut être considéré comme n'étant qu'un simple mouvement de translation, qui est le même pour toutes les molécules.

En se plaçant dans cette hypothèse, V étant la vitesse commune à tous les points et au centre de gravité du solide de masse $m$ à un instant quelconque du choc, et V' celle de tous les points et du centre de gravité du solide de masse $m'$ au même instant, on a, en négligeant pendant le choc les impulsions des forces extérieures, s'il y en a, ce que l'on peut faire, puisque la durée du choc est très-petite (*Int.*, 1487),

$$m\mathrm{V} + m'\mathrm{V}' = mv + m'v'.$$

Il y a toujours, pendant le choc, un instant où les centres de gravité des deux corps ont la même vitesse, qui est aussi la vitesse $u$ du centre de gravité du système; à cet instant, l'équation précédente devient

$$(m + m')u = mv + m'v',$$

d'où

$$u = \frac{mv + m'v'}{m + m'}.$$

$u$ est la vitesse du centre de gravité, et sensiblement aussi celle de tous les points du système à l'instant considéré, dans le cas de très-faibles vibrations.

Lorsque les deux corps ne sont pas élastiques, c'est-à-dire quand ils conservent les formes que des forces quelconques peuvent leur donner, les actions mutuelles cessent leur effet dès que la vitesse $u$ est devenue commune aux deux corps; alors les deux corps se meuvent en restant en contact, tant que des forces extérieures ne viennent pas modifier leur vitesse commune $u$.

Les formules précédentes s'appliquent au cas où les corps marchent en sens contraires, comme à celui où ils vont dans le même sens; seulement il faut avoir égard aux signes qu'il convient de donner aux valeurs de $v$ et $v'$, et par suite à celles de $mv$ et $m'v'$. Le signe de $u$ est toujours celui de la plus grande quantité de mouvement.

Si les deux quantités de mouvement sont égales et de signes contraires, la formule précédente donne $u = 0$; ce qui montre que les corps arrivent au repos, et y restent s'ils sont dénués d'élasticité.

*Dans le cas où l'un des corps est au repos, c'est-à-dire où l'on a* $v' = 0$, l'équation précédente devient

$$(m + m')u = mv, \quad \text{d'où} \quad u = \frac{mv}{m + m'}. \qquad (a)$$

**99.** *Perte de force vive due au choc de deux corps non élastiques.* Si les corps restent unis après s'être comprimés, et qu'on néglige les vibrations auxquelles peuvent être soumises les molécules des deux corps, il y a perte de force vive dans le système, puisque, pendant la compression des deux corps, et jusqu'au moment où la même vitesse est devenue commune aux deux corps, les molécules voisines du contact se sont rapprochées, et par suite les actions mutuelles répulsives de ces molécules ont produit un travail négatif, d'où il est résulté une perte de force vive (*Int.*, 1489).

Le travail dû aux forces moléculaires, et par suite la perte de force vive du système, ne dépendant que du mouvement relatif des deux corps, il en résulte que pour calculer cette perte, on peut supposer que l'un des corps est en repos et que l'autre vient le choquer avec une vitesse absolue égale à la vitesse relative du système.

Soit donc $v$ la vitesse de la masse choquante $m$, et $v' = 0$ la vitesse de la masse choquée $m'$.

La force vive du système avant le choc est $\frac{1}{2} mv^2$. Après le choc, toutes les molécules des deux corps ayant la même vitesse $u$, à cet instant la force vive du système est (29)

$$\frac{1}{2} (m + m')u^2.$$

La perte de force vive due au choc est alors

$$\varphi = \frac{1}{2} mv^2 - \frac{1}{2} (m + m')u^2.$$

Remplaçant dans cette expression $u$ par sa valeur $(a)$ (98), on obtient

$$\varphi = \frac{1}{2} \frac{mm'v^2}{m + m'}.$$

Établissant un certain rapport entre $m'$ et $m$, c'est-à-dire faisant $m' = Nm$, on conclut

$$\varphi = \frac{1}{2} mv^2 \frac{1}{1 + \frac{1}{N}}.$$

Formule qui fait voir que la perte de force vive est d'autant plus petite

que la valeur de N est plus petite, c'est-à-dire que la masse choquante est plus grande par rapport à la masse choquée.

**100.** *Corps exécutant un mouvement de rotation autour d'un axe fixe.* On appelle *vitesse angulaire* d'un corps tournant autour d'un axe, la longueur de l'arc décrit, ou qui serait décrit si le mouvement, en restant uniforme, était suffisamment prolongé, pendant l'unité de temps, par un point situé à l'unité de distance de l'axe et lié invariablement au corps.

$\omega$ étant la vitesse angulaire d'un corps, et $v$ la vitesse d'un quelconque de ses points situé à une distance $r$ de l'axe, on a, en remarquant que les vitesses des divers points sont en raison inverse de leurs distances à l'axe,

$$v : \omega = r : 1, \quad \text{d'où} \quad v = \omega r, \quad \text{et} \quad \omega = \frac{v}{r}.$$

**101.** *Force vive d'un corps tournant autour d'un axe fixe.* Lorsqu'un élément matériel $m$ tourne autour d'un axe, sa vitesse étant $\omega r$, sa force vive est (29)

$$\frac{1}{2} m\omega^2 r^2.$$

Lorsqu'un corps solide tourne, chacun de ses points matériels possède une force vive d'une expression analogue à la précédente; en faisant la somme de toutes ces forces vives élémentaires, on a la force vive du corps, qui peut alors être représentée par

$$\boldsymbol{P} = \Sigma \frac{1}{2} m\omega^2 r^2,$$

$\Sigma$ signifiant somme.

Comme $\frac{1}{2}\omega^2$ est commun à toutes les parties de cette somme, on peut le mettre en facteur commun, et poser

$$\boldsymbol{P} = \frac{1}{2}\omega^2 \Sigma m r^2.$$

$mr^2$, produit d'un élément matériel par le carré de sa distance à l'axe de rotation, est ce qu'on appelle *le moment d'inertie de l'élément* m *par rapport à l'axe.*

$\Sigma mr^2$, somme des moments d'inertie de tous les éléments matériels d'un corps par rapport à un axe, est *le moment d'inertie du corps par rapport à cet axe.*

La formule précédente fait voir que *la force vive d'un solide tournant autour d'un axe fixe est, à un instant quelconque, égale à la moitié du produit du carré de la vitesse angulaire du corps à cet instant par le moment d'inertie du corps par rapport à l'axe de rotation.*

**102.** *Rayon de gyration.* Il existe une valeur R de $r$ telle, que si toute la matière du corps se trouvait à la distance R de l'axe, la force

vive et par suite le moment d'inertie, pour une même vitesse angulaire par rapport au même axe, n'auraient pas changé.

R est ce qu'on appelle le *rayon de gyration.*

Posant (101)

$$\mathcal{P} = \frac{1}{2}\omega^2 \Sigma m r^2 = \frac{1}{2}\omega^2 R^2 \Sigma m = \frac{1}{2}\omega^2 MR^2,$$

d'où

$$\Sigma m r^2 = R^2 \Sigma m = MR^2, \qquad (a)$$

on a

$$R^2 = \frac{\Sigma m r^2}{\Sigma m} = \frac{\Sigma m r^2}{M}.$$

Lorsque les corps sont homogènes, on peut substituer aux masses élémentaires $m$, les volumes élémentaires $u$, qui leur sont proportionnels, dans l'équation $(a)$, qui devient

$$\Sigma u r^2 = R^2 \Sigma u = UR^2, \quad \text{d'où} \quad R^2 = \frac{\Sigma u r^2}{U};$$

alors le rayon de gyration peut être défini et déterminé indépendamment de toute notion de mécanique.

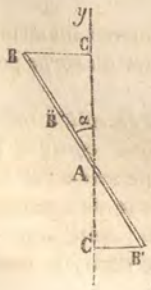
La détermination des rayons de gyration des corps homogènes et de figures géométriques est du domaine du calcul intégral. Nous allons énoncer leurs valeurs pour les corps qui ont des formes employées dans la pratique.

Ayant le rayon de gyration, $MR^2$ donnera le moment d'inertie, et $\frac{1}{2}\omega^2 MR^2$ la force vive. P étant le poids du corps tournant, on a $M = \frac{P}{g}$, et par suite

$$MR^2 = \frac{P}{g} R^2, \quad \text{et} \quad \mathcal{P} = \frac{1}{2}\omega^2 \frac{P}{g} R^2.$$

**103.** *Pour une tige homogène* AB *d'une très-petite section, tournant autour de l'axe* Ay *passant par son extrémité,* on a (*Int.*, 1465)

Fig. 11.




$$R^2 = \frac{1}{3}\overline{BC}^2.$$

Le moment d'inertie est alors, P étant le poids de la tige (102),

$$\frac{P}{g} R^2 = \frac{1}{3}\frac{P}{g}\overline{BC}^2,$$

et la force vive

$$\frac{1}{6}\frac{P}{g}\omega^2 \overline{BC}^2.$$

*Pour la tige* BB′, *qui est rencontrée par l'axe en un point quelconque de sa longueur*, $r$ étant le rayon de gyration de la partie AB, et $r'$ celui de la partie AB′, on a

$$r^2 = \frac{1}{3}\overline{BC}^2 \quad \text{et} \quad r'^2 = \frac{1}{3}\overline{B'C'}^2.$$

P et P′ étant les poids des parties AB et AB′ de la tige, les moments d'inertie de ces parties sont respectivement

$$\frac{P}{g}r^2 = \frac{1}{3}\frac{P}{g}\overline{BC}^2 \quad \text{et} \quad \frac{P'}{g}r'^2 = \frac{1}{3}\frac{P'}{g}\overline{B'C'}^2.$$

Le moment d'inertie de la tige totale étant égal à la somme des moments d'inertie des deux parties, on a donc, R étant le rayon de gyration de la tige totale,

$$\frac{P+P'}{g}R^2 = \frac{1}{3}\frac{P}{g}\overline{BC}^2 + \frac{1}{3}\frac{P'}{g}\overline{B'C'}^2, \quad \text{d'où} \quad R^2 = \frac{P \times \overline{BC}^2 + P' \times \overline{B'C'}^2}{3(P+P')}.$$

Dans le cas où le point A est le milieu, c'est-à-dire le centre de gravité de la tige, on a B′C′ = BC, P′ = P ou P + P′ = 2P, et la formule précédente donne

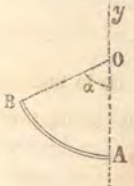
$$R^2 = \frac{1}{3}\overline{BC}^2.$$

Ce qui fait voir que le rayon de gyration de la tige totale est le même que celui de chacune de ses parties considérées séparément.

Si l'axe rencontrait le prolongement de la tige BB″, on remarquerait que le moment d'inertie de BB″ est la différence des moments d'inertie des tiges BA et B″A, et on l'obtiendrait en suivant la même marche que pour déterminer le moment d'inertie de BB′. Du reste, nous verrons (115) comment, étant connu le moment d'inertie d'un corps par rapport à un axe passant par son centre de gravité, on peut déterminer son moment d'inertie par rapport à un axe quelconque parallèle au premier.

**104.** *Pour une tige en arc de cercle* AB, *d'une très-petite section, tournant autour de son rayon* OA *passant par une de ses extrémités*, on a

Fig. 12.




$$R^2 = \frac{1}{2}\rho^2\left(1 - \frac{1}{2}\frac{\rho}{l}\sin 2\alpha\right); \qquad (a)$$

$\rho$ = OA rayon de courbure de la tige;
$l$ = arc AB longueur de la tige;
$\alpha$ angle au centre correspondant à l'arc AB.

Pour un quart de cercle, ou un demi-cercle, ou trois quarts de cercle..., c'est-à-dire pour $\alpha = 90°$, $\alpha = 180°$, $\alpha = 270°$... on a $\sin 2\alpha = 0$. et, par suite,

$$R^2 = \frac{1}{2}\rho^2.$$

Ayant $R^2$, on aura le moment d'inertie en multipliant par la masse $\frac{P}{g}$ de la tige, et ce moment d'inertie multiplié par $\frac{1}{2}\omega^2$, moitié du carré de la vitesse angulaire à un certain instant, donnera la force vive à cet instant.

A l'aide de la formule $(a)$, et en suivant la même marche qu'au numéro précédent, on déterminerait le rayon de gyration, le moment d'inertie et la force vive, soit que l'axe OA rencontre l'arc AB en un point quelconque compris entre A et B, soit qu'il rencontre le prolongement de cet arc.

On verrait encore que quand l'axe rencontre l'arc au milieu, c'est-à-dire quand il passe par son centre de gravité, le rayon de gyration de l'arc entier est le même que pour chacune des deux moitiés prises séparément.

**105.** *Pour un disque en quart de cercle d'une très-faible et uniforme épaisseur*, tournant autour d'un des rayons qui le limitent, ou pour un demi-cercle qui tourne autour du diamètre qui le limite, ou encore pour trois quarts de cercle et pour un cercle entier, on a

$$R^2 = \frac{1}{4}\rho^2,$$

$\rho$ étant le rayon du disque.

Ayant $R^2$, on obtiendra facilement le moment d'inertie, puisque, connaissant les dimensions du disque, on peut calculer son volume, lequel, multiplié par la densité de la matière, donne le poids du disque. Ayant le moment d'inertie, on obtient la force vive en le multipliant par la moitié du carré de la vitesse angulaire (102).

**106.** *Un cylindre droit à base circulaire tournant autour de son axe, ou un secteur quelconque de ce cylindre tournant autour de cet axe*, donne, R étant le rayon de gyration et $\rho$ le rayon du cylindre,

$$R^2 = \frac{1}{2}\rho^2.$$

Ayant $R^2$, on détermine le moment d'inertie, puis la force vive, comme au numéro précédent.

**107.** *Pour une jante à section rectangulaire, ou pour une portion de cette jante tournant autour de l'axe*, on a

$$R^2 = \frac{1}{2}(\rho^2 + \rho'^2),$$

ou, en remplaçant les rayons intérieur et extérieur $\rho$ et $\rho'$ de la jante en fonction du rayon moyen $\rho_1 = \frac{\rho + \rho'}{2}$, et de la dimension de la jante mesurée suivant le rayon, $b = \rho - \rho'$,

$$R^2 = \rho_1^2\left(1 + \frac{1}{4}\frac{b^2}{\rho_1^2}\right).$$

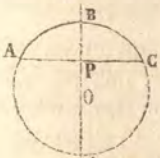
**108.** *Un cône droit à base circulaire tournant autour de son axe donne,* $\rho$ *étant le rayon de cette base,*

$$R^2 = \frac{3}{10}\rho^2.$$

**109.** *Pour un tronc de cône tournant autour de son axe*, on remarquerait que le moment d'inertie du tronc est égal au moment d'inertie du cône total, moins le moment d'inertie du cône retranché pour obtenir le tronc. Ayant le moment d'inertie du tronc, en le divisant par la masse $\frac{P}{g}$ du tronc, on aurait $R^2$.

**110.** *Un segment sphérique* ABC, *à une base, tournant autour du diamètre* BB' *perpendiculaire au plan de sa base, c'est-à-dire passant par son centre de gravité*, on a

Fig. 13.




$$R^2 = \frac{h}{10} \times \frac{20\rho^2 - 15\rho h + 3h^2}{3\rho - h};$$

$\rho$ rayon de la sphère;
$h$ = BP hauteur du segment.

*Pour une demi-sphère*, $h = \rho$, et la formule précédente devient

$$R^2 = \frac{2}{5}\rho^2.$$

*Pour la sphère entière*, $R^2$ a aussi cette dernière valeur.

**111.** *Pour une zone sphérique* ABC, *à une base* (fig. 13), *tournant autour du diamètre* BB' *perpendiculaire à sa base, l'épaisseur de la calotte étant très-mince*, on a, $\rho$ et $h$ ayant les mêmes significations qu'au numéro précédent,

$$R^2 = h\left(\rho - \frac{h}{3}\right).$$

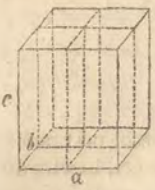
*Si la calotte était une demi-sphère*, on aurait $h = \rho$, et, par suite,

$$R^2 = \frac{2}{3}\rho^2.$$

*Pour une sphère creuse entière et très-mince* on aurait aussi cette dernière valeur pour $R^2$.

**112.** *Un parallélipipède rectangle ayant* a, b, c *pour arêtes, et tournant autour de l'arête* c, *donne* (*Int.*, 1474)

Fig. 14.




$$R^2 = \frac{1}{3}(a^2 + b^2). \qquad (a)$$

*Si le parallélipipède, au lieu de tourner autour de* c, *tournait autour d'un axe parallèle à* c, *et mené par le milieu de* b, on aurait

$$R^2 = \frac{1}{3}\left(a^2 + \frac{1}{4}b^2\right);$$

ce qui revient à remplacer $b$ par $\frac{1}{2}b$ dans la formule $(a)$.

*Si l'axe était mené parallèlement à* c *par le centre de figure, qui est aussi le centre de gravité*, il faudrait, dans la formule $(a)$, remplacer $b$ par $\frac{1}{2}b$ et $a$ par $\frac{1}{2}a$; d'où il résulterait

$$R^2 = \frac{1}{12}(a^2 + b^2).$$

**113.** *Pour un ellipsoïde quelconque*, c'est-à-dire pour un ellipsoïde dont le plan perpendiculaire au grand axe $2a$ détermine, non pas un cercle de diamètre $2b$, comme pour l'ellipsoïde de révolution (*Int.*, 1081), mais une ellipse ayant $2b$ et $2c$ pour axes, suivant que l'ellipsoïde tourne autour de l'axe $2c$, ou $2b$, ou $2a$, on a respectivement

$$R^2 = \frac{1}{5}(a^2 + b^2), \quad R^2 = \frac{1}{5}(a^2 + c^2), \quad R^2 = \frac{1}{5}(b^2 + c^2).$$

*Lorsque l'ellipsoïde est de révolution*, on a $c = b$, et les trois formules précédentes se réduisent aux deux suivantes :

$$R^2 = \frac{1}{5}(a^2 + b^2), \quad R^2 = \frac{1}{5}(b^2 + b^2) = \frac{2}{5}b^2,$$

applicables respectivement aux cas où l'ellipsoïde tourne autour de son petit ou grand axe.

Le volume de l'ellipsoïde quelconque étant $\frac{4}{3}\pi abc$, et celui de l'ellipsoïde de révolution, $\frac{4}{3}\pi a^2 b$, ou $\frac{4}{3}\pi b^2 a$, suivant que l'ellipse génératrice tourne autour du petit ou grand axe (*Int.*, 1083), multipliant ce volume par la densité de la matière, on aura le poids P, on en conclura la masse $\frac{P}{g}$, et par suite le moment d'inertie $\frac{P}{g}R^2$.

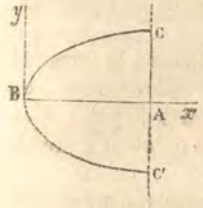
Faisant $a = b = \rho$, les formules relatives à l'ellipsoïde de révolution donnent

$$R^2 = \frac{2}{5}\rho^2.$$

Ce qui devait être, puisqu'alors l'ellipsoïde est une sphère (110).

114. *Pour un cylindre droit à base demi-parabolique* ABC *tournant autour de l'arête qui se projette en* A, *on a*

Fig. 15.




$$R^2 = \frac{1}{5}\left(\frac{8}{7}a^2 + b^2\right),$$

$a = AB$,

$b = AC$.

*Pour un cylindre droit à base parabolique* CBC', on a la même valeur pour $R^2$.

On a (*Int.*, 1130) surface ABC $= \frac{2}{3}ab$; connaissant la hauteur du cylindre, on déterminera son volume, puis son poids, et ensuite le moment d'inertie.

115. R étant le rayon de gyration d'un corps par rapport à un axe quelconque, et R' celui par rapport à l'axe passant par le centre de gravité du corps, on a, en appelant $k$ la distance des deux axes,

$$MR^2 = MR'^2 + MK^2, \quad \text{d'où} \quad R^2 = R'^2 + k^2 \ (\textit{Int.}, 1477).$$

Ce qui fait voir que *le carré du rayon de gyration d'un système par rapport à un axe quelconque, est égal au carré du rayon de gyration du même système par rapport à l'axe mené parallèlement au premier par le centre de gravité, plus le carré de la distance des deux axes.*

Cette formule est employée dans la pratique, où il arrive souvent que l'on a à déterminer le rayon de gyration par rapport à un axe, pour un corps dont on connaît le rayon de gyration par rapport à un axe parallèle passant par le centre de gravité.

116. *Marteaux. Perte de force vive due au choc des cames.* Considérant une bague à cames comme étant un cylindre plein, le carré de son rayon de gyration est (102 et 106)

$$\frac{1}{2}\rho^2,$$

et son moment d'inertie, en appelant M la masse de la bague,

$$\frac{1}{2}M\rho^2.$$

Appelant M' la masse du corps qui a, en le supposant concentré au point d'impact, c'est-à-dire au point de la came qui frappe le marteau,

le même moment d'inertie que la bague tournant autour de son axe, et R la distance de ce point d'impact à l'axe de rotation, on a

$$M'R^2 = \frac{1}{2} M\rho^2, \quad \text{d'où} \quad M' = \frac{1}{2} M \frac{\rho^2}{R^2}.$$

Il faut calculer de même la masse M″ du corps, lequel, étant appliqué au point d'impact, a le même moment d'inertie que l'arbre de la bague, et posant $m = M' + M''$, $m$ représente la masse choquante à faire intervenir dans la formule du n° 99.

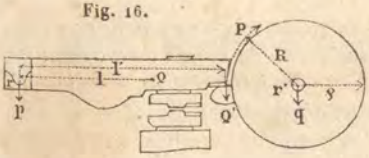
En opérant d'une manière analogue, et en ayant égard à la forme et à la nature des différentes parties du marteau et de son manche, on détermine la masse choquée $m'$, laquelle, étant appliquée au point d'impact, a, par rapport à l'axe de la *hurasse*, le même moment d'inertie que le marteau avec son manche.

Ayant $m$ et $m'$, la formule du n° 99 donne la perte de force vive pour chaque soulèvement du marteau, en remarquant que la vitesse du corps choqué est nulle, et que la vitesse moyenne du corps choquant est, $n$ étant le nombre de tours de la bague par minute,

$$v = \frac{2\pi R n}{60}.$$

**117.** *Équilibre dynamique des marteaux.* Soit un *marteau frontal* (*fig.* 16). On remplace le poids du marteau et de son manche par un poids, lequel, étant appliqué au point d'impact, a, par rapport à l'axe de la hurasse, le même moment que le poids du marteau et de son manche; on en fait autant pour le frottement des tourillons de la hurasse, pour celui des tourillons de l'arbre à cames et pour celui qui s'exerce entre les cames et le marteau; et le travail absorbé pour élever tous ces poids fictifs, augmenté de la perte de force vive due au choc, étant égal au travail que doit produire la puissance, l'équilibre dynamique donne, pour une minute,

Fig. 16.




$$n \times 2\pi RP = nn'h\left(\frac{Ql}{l'} + \frac{f'pr}{l'} + \frac{f'qr'}{R} + Q'\frac{fh}{2} \times \frac{R + l'}{Rl'}\right) + \frac{nn'}{2} \times \frac{mm'v^2}{m+m'}.$$

$n$ nombre de tours de la bague en une minute;
$n'$ nombre des cames montées sur la bague;
P puissance agissant sur l'arbre à cames à l'extrémité d'un bras de levier égal à la distance du point d'impact à l'axe de l'arbre à cames;
R bras de levier de la puissance P;
$h$ levée du marteau au point d'impact;
Q poids du marteau et de son manche;

$l$ distance du centre de gravité du marteau et de son manche à l'axe de rotation de la hurasse ;

$l'$ distance du point d'impact à l'axe de rotation de la hurasse ;

$f' = 0{,}15$ coefficient de frottement des tourillons de la hurasse, et de ceux de l'arbre à cames ;

$p = Q\,\frac{l'-l}{l'}$ poids reposant sur les tourillons de la hurasse ; c'est la partie du poids du marteau et de son manche supportée par ces tourillons (*Int.*, 1390) ;

$r$ rayon des tourillons de la hurasse ;

$q$ pression des tourillons de l'arbre à cames sur leurs coussinets ;

$r'$ rayon des tourillons de l'arbre à cames ;

$f = 0.25$ coefficient de frottement des cames sous la tête du marteau ;

$Q' = \frac{Ql}{l'}$ pression qui s'exerce entre les cames et la tête du marteau, en ne tenant compte que de la pression due au poids du marteau et en négligeant celle qui provient du frottement des tourillons de la hurasse ;

$m$ masse choquante transportée au point d'impact, calculée comme il est indiqué n° 116 ;

$m'$ masse choquée transportée au point d'impact, calculée comme la masse choquante ;

$v = \frac{2\pi Rn}{60}$ vitesse moyenne des cames au point d'impact (116) ;

$n \times 2\pi RP$ travail moteur dépensé par minute ;

$Q\,\frac{l}{l'}$ poids du marteau et de son manche, transporté au point d'impact ;

$f'p\,\frac{r}{l'}$ poids qui, étant appliqué au point d'impact, produit le même effet que le frottement des tourillons de la hurasse ;

$Q'\,\frac{fh}{2} \times \frac{R+l'}{Rl'}$ frottement des cames sous la tête du marteau ; il est analogue à celui des engrenages (82) ;

$\frac{nn'}{2} \times \frac{mm'v^2}{m+m'}$ perte de force vive due aux chocs des cames sous le marteau (116).

De la formule précédente on tire

$$P = \frac{n'h}{2\pi R}\left(\frac{Ql}{l'} + \frac{f'pr}{l'} + \frac{f'qr'}{R} + fQ'\,\frac{h}{2} \times \frac{R+l'}{Rl'}\right) + \frac{n'}{4\pi R} \times \frac{mm'v^2}{m+m'}.$$

Pour un autre genre quelconque de marteau, on déterminerait la valeur de P en opérant d'une manière analogue.

*Les marteaux à bascule, dits martinets*, employés à l'étirage et au platinage des petits fers, au raffinage des aciers et à la fabrication de divers outils, frappent de 200 à 400 coups par minute, et leur poids, qui diminue à mesure que le nombre des coups frappés augmente, varie, non compris le poids du manche qui est en bois, de 80 à 40 kilog. La longueur totale du manche, comptée depuis l'axe de la tête du marteau, varie de $2^m,50$ à 3 mètres ; le point de rotation est ordinairement aux 2/3 de cette longueur à partir de l'axe de la tête du marteau ; cependant il est aux 3/4 et quelquefois plus, quand le marteau doit frapper un grand nombre de coups. Le nombre des cames montées sur la bague varie ordinairement de 14 à 16. Pour une grande vitesse, la levée du

marteau varie de $0^m,25$ à $0^m,27$ ; pour une vitesse petite, elle varie de $0^m,50$ à $0^m,55$, et pour une vitesse moyenne, elle est comprise entre $0^m,30$ et $0^m,40$.

*Les marteaux à soulèvement*, employés particulièrement à l'affinage du fer par la méthode allemande, frappent de 70 à 200 coups à la minute, et leur poids, non compris le manche, qui est en bois, varie de 300 à 400 kilog. La longueur du manche, comptée depuis l'axe de la tête du marteau jusqu'au point de rotation de la *bague*, varie de $2^m,10$ à $2^m,60$, et la distance de cet axe au point frappé par les cames, de $0^m,40$ à $0^m,55$. Il y a ordinairement cinq cames montées sur la bague. La levée du marteau est de $0^m,55$ environ.

Enfin, *les marteaux frontaux*, mis en usage dans les forges où l'on fabrique le fer par la méthode anglaise, frappent de 60 à 100 coups par minute, et pèsent, y compris le manche, qui est tout en fonte, de 2500 à 4000 kilog., et même quelquefois plus. La longueur du manche, depuis le point d'impact jusqu'à l'axe de rotation, varie de $2^m,30$ à $2^m,80$. Le nombre des cames est ordinairement égal à 5. La levée du marteau varie de $0^m,35$ à $0^m,40$.

Dans la pratique, d'après M. Poncelet, le rapport de la masse fictive choquante $m$ à la masse fictive choquée $m'$ est rarement inférieure à 10 (116). Pour les martinets et marteaux à soulèvement employés à la fabrication du fer, ce rapport n'est pas inférieur à 12, et pour les marteaux frontaux, il est au moins 30.

**113.** *Marteau-pilon.* Depuis quelques années, dans plusieurs usines à fer, et surtout dans les grands ateliers de construction, on fait usage du *marteau-pilon* mû directement par la vapeur. Ces marteaux ont été établis dans des proportions très-diverses: ainsi, il y en a qui pèsent 100 kilogrammes seulement, et d'autres 4000 kilog.; ceux de 100 à 1000 kilog. donnent de 80 à 100 coups par minute, et ceux de 2000 à 4000 kilog. en donnent de 60 à 70.

On a établi des marteaux-pilons du poids de 3500 à 4000 kilog., dont les chutes atteignent 2 mètres à $2^m,50$.

Un avantage capital de ces marteaux, c'est qu'on peut faire varier leur chute et leur vitesse avec la plus grande facilité, selon les dimensions et l'état de dureté de la pièce que l'on forge.

Dimensions d'un marteau-pilon établi par M. Nillus, du Havre, d'après le système Nasmyth, pour les ateliers de la marine à Brest :

| | | |
|---|---|---|
| Poids | total des deux bâtis. . . . . | 14 000 kil. |
| *id.* | de la plaque de fondation. . . . . | 8 000 |
| *id.* | du cylindre. . . . . | 3 500 |
| *id.* | du marteau. . . . . | 3 500 |
| *id.* | des accessoires en fer. . . . . | 1 200 |
| *id.* | *id.* en fonte de cuivre. . | 400 |
| | Total. . . . . | 30 600 |

L'enclume ayant été fabriquée à Brest, son poids n'est pas compris dans ce total.

| | |
|---|---|
| Pression habituelle de la vapeur. . . . . | 5 atmosphères. |
| Diamètre du cylindre. . . . . | $0^m.60$ |
| Course du piston ou levée du marteau. . . | $2^m.00$ |
| Diamètre de la tige. . . . . | $0^m.10$ |

**119.** *Volants pour marteaux.* Le travail produit par la force P (117), pendant la durée totale d'un coup de marteau, étant absorbé pendant l'instant que met la came à soulever le marteau, il faut que le volant, ou l'attirail (roue et arbre à cames) qui le remplace le plus souvent, accumule, depuis l'instant où une came quitte le marteau jusqu'à l'instant où la came suivante le reprend, une quantité de force vive égale à l'excès du travail $\mathcal{T}'$ produit par la force P pendant la durée totale d'un coup, sur le travail $\mathcal{T}''$ que produit cette force pendant le temps d'action de la came.

Le travail produit par P étant régulier, on aura $\mathcal{T}'$ et $\mathcal{T}''$ quand on connaîtra les temps pendant lesquels ces quantités de travail sont produites. On connaît $\mathcal{T}'$, puisqu'on a le nombre des coups de marteau frappés dans un temps donné, et par suite la durée d'un coup. Comme la vitesse de rotation de la bague est à peu près régulière, à l'aide d'une épure représentant la position des cames sous le manche du marteau, on aura l'arc décrit par la bague pendant l'action de la came, et, par suite, la durée de cette action, ce qui permettra de déterminer $\mathcal{T}''$. Cette épure servira aussi à trouver l'écartement à donner aux cames, écartement qui doit être tel, que, pendant l'instant d'inaction de deux cames successives, le marteau ait le temps de réagir sur le rabat et de redescendre sur l'enclume ; sans quoi, le marteau *camerait*, c'est-à-dire retomberait sur la came qui arrive pour le soulever, avant d'avoir produit son effet sur le fer. D'après M. Faure, il résulterait de quelques observations faites par M. Walter de Saint-Ange sur des marteaux et martinets établis, que, pour les marteaux à soulèvement, le temps nécessaire à la réaction sous le rabat et à la descente varie de $1{,}04t$ à $1{,}15t$, et que, pour les martinets, il varie de $0{,}45t$ à $0{,}88t$, suivant que le nombre des coups frappés est respectivement plus grand ou plus petit.

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}. \qquad (19)$$

$t$ durée de la descente libre du centre de gravité de l'ensemble du marteau et du manche ;

$h$ levée de ce centre de gravité ; $h$ correspond au point où la came quitte le manche du marteau, point auquel doit commencer l'action du rabat.

Les marteaux frontaux marchant lentement, ils ne s'élèvent pas au delà du point où les cames les quittent ; de sorte que, sauf le retard

causé à la descente par la réaction du fer sous le marteau et par les frottements des tourillons de la hurasse, la durée d'inaction des cames peut être égale à $t = \sqrt{\frac{2h}{g}}$ ; mais, d'après les observations de M. Walter de Saint-Ange, dans la pratique, on fait varier cette durée, comme pour les marteaux à soulèvement, de $1{,}04$ à $1{,}15t$.

Q étant le poids du volant, V sa vitesse à l'instant où la came quitte le marteau, et V′ sa vitesse au moment où la came suivante commence son action, on doit avoir (30)

$$\frac{Q}{2g}(V'^2 - V^2) = T' - T''.$$

Comme on ne connaît pas les valeurs de V′ et V, on établit entre elles et la valeur de la vitesse moyenne $v = \frac{2\pi rn}{60}$ (116) une relation dont il ne convient pas de s'écarter dans la pratique ; ainsi on pose

$$V' - V = \frac{v}{K},$$

et comme on peut supposer que l'on a

$$V' + V = 2v,$$

multipliant ces deux équations membre à membre, il vient

$$V'^2 - V^2 = \frac{2v^2}{K},$$

et par suite

$$\frac{Q}{2g} \times \frac{2v^2}{K} = \frac{Qv^2}{gK} = T' - T'',$$

K coefficient de régularité de vitesse, que, dans ce cas, l'on fait égal à 20 ; la grande régularité n'étant pas de rigueur (93).

C'est par des considérations analogues qu'on a établi les formules des nos 93 et 94, et que l'on déterminerait le poids d'un volant dans un cas quelconque ; quand, toutefois, on connaît les durées des actions et de leurs intervalles, et que l'on peut apprécier le travail absorbé pour chaque action : ainsi, pour les laminoirs, par exemple, ces données ne pouvant être posées d'une manière analytique, on ne peut donner qu'une formule empirique pour calculer le poids de leurs volants (120).

M. Morin donne la formule suivante pour calculer le poids des volants pour marteaux :

$$P = \frac{K}{R^2}.$$

P Poids de la jante du volant en kilogrammes ;
R rayon moyen de la jante du volant ;
K coefficient. Pour les marteaux frontaux, K = 20000 ou 30000, selon que le poids des marteaux varie de 3000 à 3500 kilogrammes, ou de 4000 à 4900 kilogrammes. Pour les marteaux à l'allemande conduits par un engrenage, dont le poids total, y compris le manche, la hurasse et les ferrures, varie ordinairement de 600 à 800 kilogrammes, et qui battent de 100 à 110 coups en une minute, le volant étant monté sur l'arbre à cames, K = 15000. Pour les martinets à engrenages, qui battent ordinairement de 150 à 200 coups à la minute, K = 6000 ou 9000, selon que le poids du martinet, y compris le manche et les ferrures, est 360 ou 500 kilogrammes.

**120.** *Les poids des volants de laminoirs pour les grandes tôles et pour l'étirage des fers en barres peut se calculer,* d'après M. Morin, *par la formule*

$$P = \frac{130000NK}{mv^2}.$$

P poids de la jante du volant en kilogrammes ;
N force en chevaux transmise par le moteur à l'arbre du volant ;
$v$ vitesse moyenne de la jante du volant ;
$m$ nombre de tours des cylindres en 1′ ;
K coefficient numérique qui est égal : 1° à 20 pour les machines de 80 à 100 chevaux faisant marcher à la fois 6 à 8 équipages de cylindres à tôle ou à fer en barres ; 2° à 25 pour les machines de 60 chevaux faisant marcher 4 à 6 équipages pour l'étirage des fers ; 3° à 80 pour les machines de 30 à 40 chevaux ne faisant marcher à la fois qu'un seul équipage de cylindres à grosses tôles, ou deux équipages de cylindres ébaucheurs et finisseurs pour les petits fers.

Les valeurs données pour K s'appliquent aux laminoirs conduits par des machines à vapeur, des roues à augets et des roues de côté ; mais pour les roues à aubes courbes ou à aubes planes recevant l'eau en dessous, la vitesse étant très-grande, on diminue un peu les valeurs précédentes de K.

**121.** *Forces centripète et centrifuge* (*Int.*, 1509). Lorsqu'un mobile suit une circonférence ou seulement un arc de cercle, c'est qu'il est sollicité en chaque point de son mouvement par deux forces, l'une tangentielle à l'arc suivi, et l'autre dirigée vers le centre de cet arc.

La direction de cette dernière force lui a fait donner le nom de *force centripète.*

La réaction égale et contraire à la force centripète, et qui fait que le mobile s'écarte suivant le rayon quand tout à coup la force centripète est supprimée, prend le nom de *force centrifuge.* La fronde rend bien compte de cet effet.

Les forces centripète et centrifuge ont pour expression commune abstraction faite du signe,

$$C = \frac{mv^2}{r} = \frac{Pv^2}{gr}.$$

C forces centripète et centrifuge ;
$m$ masse du corps en mouvement ;
$v$ vitesse du centre de gravité du corps ;
$r$ rayon de la circonférence décrite par le centre de gravité du corps ;
$P = mg$ poids du mobile (23).

**122.** *Pendule simple* (*Intr.*, 1519). La durée d'une oscillation complète du pendule simple est, lorsque l'amplitude est très-petite,

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

T durée de l'oscillation ;
$l$ longueur du pendule ;
$g$ accélération de vitesse due à la pesanteur (18) dans le lieu où oscille le pendule.

Cette expression de la durée d'une très-petite oscillation du pendule simple fait voir que, pour un même pendule ou pour des pendules de même longueur, les oscillations sont *isochrones*, c'est-à-dire de même durée, partout où la valeur de $g$ est la même.

Pour un pendule d'une longueur $l'$, oscillant dans un lieu où $g = g'$, on aurait

$$T' = \pi \sqrt{\frac{l'}{g'}};$$

donc

$$T : T' = \sqrt{\frac{l}{g}} : \sqrt{\frac{l'}{g'}}.$$

Lorsque $g = g'$, cette proportion devient

$$T : T' = \sqrt{l} : \sqrt{l'};$$

et pour $l = l'$,

$$T : T' = \sqrt{\frac{1}{g}} : \sqrt{\frac{1}{g'}} = \sqrt{g'} : \sqrt{g},$$

proportions faciles à traduire verbalement.

*Application.* Quelle est la longueur du pendule simple qui bat les secondes à Paris ?

De la formule $T = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ on tire $l = \frac{gT^2}{\pi^2}$.

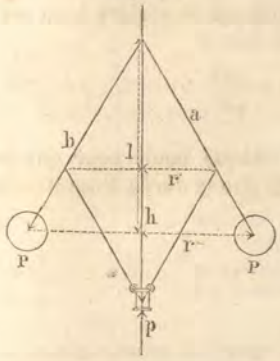
Remplaçant $\pi$, $g$ et T par leurs valeurs, on a

$$l = \frac{9{,}8088 \times 1 \times 1}{3{,}14159 \times 3{,}14159} = 0^m{,}99384.$$

On trouverait de même la longueur du pendule dont la très-petite oscillation doit avoir une durée quelconque (*Int.*, 1522).

**123.** *Pendule conique* (fig. 17) (*Int.*, 1517). La durée d'une oscillation du pendule conique, c'est-à-dire le temps que met la boule à faire une révolution autour de l'axe, est

Fig. 17.




$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

T durée de l'oscillation; la formule fait voir qu'elle est double de celle du pendule simple de même longueur (122);

$l$ longueur du pendule conique; ce n'est pas la longueur de la tige du pendule, mais seulement la projection de cette tige sur la verticale; nous l'appellerons hauteur du pendule.

L'isochronisme des oscillations a lieu dans les mêmes circonstances que pour le pendule simple, et les proportions posées n° 122 se reproduisent également pour le pendule conique.

Ce qui vient d'être dit s'applique au cas où le pendule a plusieurs boules, comme à celui où il n'en a qu'une.

Suivant que T augmente ou diminue, la hauteur $l$ augmente ou diminue, et on conçoit que l'on peut utiliser l'oscillation qu'en subit le manchon inférieur, pour faire mouvoir l'organe qui introduit la vapeur dans le cylindre d'une machine à vapeur, ou l'eau sur une roue hydraulique, et, par suite, régler l'arrivée de ces matières motrices de manière à obtenir une vitesse que l'on peut considérer comme constante dans la pratique.

Le poids de chacune des boules d'un pendule conique est donné par la formule :

$$P = \frac{pa(bh + al)(n-1)^2}{(2n-1)2b^2h}.$$

P poids d'une boule;

$p$ force qu'il faut appliquer au manchon inférieur, au repos et avant que les boules soient en place, pour le soulever ainsi que les tiges quand il est dans la position qui correspond à la vitesse de régime, pour laquelle on a $T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$.

On détermine $p$ au moyen d'une balance, ou d'un fil très-flexible passant sur une petite poulie très-mobile; $p$ comprend aussi l'effort à produire sur le manchon pour manœuvrer la soupape régulatrice;

$a$ distance du point d'oscillation supérieur au point où les tiges supérieures s'articulent avec les tiges inférieures, mesurée sur les tiges mêmes;

$b$ longueur totale de chacune des tiges supérieures;

$h$ projection de chacune des tiges inférieures sur la verticale ;
$l$ hauteur du pendule ou projection de $b$ sur la verticale ;
$n$ coefficient de latitude de durée d'oscillation, avant que le pendule modère la vitesse de la machine.

La durée d'oscillation correspondant à la vitesse de régime de la machine étant

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \quad \text{d'où} \quad l = \frac{gT^2}{4\pi^2},$$

la formule précédente donne le poids de chaque boule pour que le pendule agisse sur la soupape régulatrice dès que la durée d'oscillation est

$$T' = T\,\frac{n-1}{n},$$

ce qui donne

$$l' = \frac{gT^2\,\frac{(n-1)^2}{n^2}}{4\pi^2}.$$

La valeur de $n$ dépend de la nature du travail à produire ; elle est ordinairement comprise entre 10 et 20.

A l'aide d'une épure, on détermine la quantité dont s'élève le manchon pour la différence $l - l'$ des hauteurs du pendule.

On obtient la vitesse correspondant à T au moyen d'une poulie fixée au pendule, à laquelle on transmet le mouvement à l'aide d'une corde ou d'une courroie sans fin qui communique avec l'arbre de la machine.

Quand les tiges du pendule forment entre elles un parallélogramme, disposition qu'il convient d'adopter quand rien ne s'y oppose, on a $bh = al$, et la formule qui donne le poids d'une boule devient

$$P = \frac{pa(n-1)^2}{(2n-1)b}.$$

Dans l'établissement de ces formules qui donnent la valeur de P, on a négligé l'effet de la force centrifuge sur les tiges ; les résultats obtenus sont donc un peu faibles.

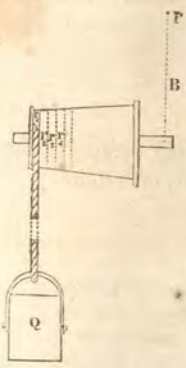
Dans la pratique, on fait les boules creuses, et on y introduit peu à peu de la grenaille de plomb que l'on fait fondre quand le poids de la boule est tel, que la soupape régulatrice fonctionne dès qu'on a

$$T' = T\,\frac{n-1}{n}.$$

Ordinairement, le poids des boules est compris entre 15 et 35 kilog.

**124.** *Treuil régulateur.* Le rayon à donner au treuil (*fig.* 18), au point correspondant à la position d'une spire quelconque de la corde qui s'enroule, pour que l'effort à produire pour manœuvrer le treuil reste constant, malgré la plus ou moins grande longueur de corde déroulée, est donnée par la formule

Fig. 18.




$$r + e = \frac{PB}{Q + pl}.$$

$r$ rayon cherché ;
$e$ rayon de la corde ;
P force motrice ;
B bras de levier de la force motrice ;
Q poids élevé ;
$p$ poids du mètre de longueur de corde ;
$l$ longueur de corde déroulée.

La corde venant toujours se placer à côté d'elle-même à mesure qu'elle s'enroule, dès qu'on a son diamètre, on connaît à très-peu près la position des différentes spires suivant la longueur de l'axe du treuil, en portant successivement le diamètre de la corde sur cet axe.

La longueur de corde déroulée après un nombre quelconque $n$ de révolutions du treuil est

$$l_n = L - 2\pi[ne + (r_1 + r_2 + r_3 + \ldots + r_n)].$$

$l_n$ longueur de corde déroulée,
L longueur totale de la corde ;
$n$ nombre des spires qui se trouvent sur le treuil ;
$r_1$, $r_2$, $r_3$,... $r_n$ rayons du treuil correspondant à la 1re, 2e, 3e... $n^e$ spire.

Comme théoriquement le treuil régulateur différerait très-peu d'un tronc de cône, dans la pratique, on se contente de cette forme, dont le petit et le grand rayons se tirent des formules :

$$r + e = \frac{PB}{Q + pL}, \quad R + e = \frac{PB}{Q}.$$

$r$ petit rayon du treuil ;
R grand rayon du treuil.

Pour l'exploitation des mines, on fait usage du treuil régulateur, et, afin de ne pas perdre de temps pendant sa manœuvre, on emploie deux cordes, dont une s'enroule et monte la charge pendant que l'autre se déroule et descend à vide. Cette disposition exige l'emploi de treuils semblables à celui (*fig.* 18), montés sur le même axe, accolés par leurs grandes bases, et dont les rayons sont calculés d'après les considérations suivantes :

1° Quand un fardeau est en bas, sa corde est complétement déroulée, tandis que l'autre est complétement enroulée et non chargée; on a donc

$$PB = (Q + pL)(r + e);$$

d'où l'on tire

$$r + e = \frac{PB}{Q + pL}.$$

2° Pour le fardeau qui arrive en haut, la corde est complétement enroulée, tandis que l'autre est entièrement déroulée; on a donc

$$PB = Q(R + e) - pL(r + e);$$

d'où l'on tire, en remplaçant $r + e$ par sa valeur (1°),

$$R + e = \frac{PB}{Q} + \frac{pLPB}{Q(Q + pL)} = \frac{PB}{Q}\left(1 + \frac{pL}{Q + pL}\right).$$

$r$ petit rayon de chaque treuil;
R grand rayon de chaque treuil.

On fait encore usage d'un autre genre de treuil appelé *bobine*, dans lequel la corde, qui est plate, ou la courroie s'enroule sur elle-même, de manière qu'après chaque tour son épaisseur s'ajoute au rayon de la bobine, c'est-à-dire au bras de levier de la résistance. Comme il est impossible de bien régulariser cette machine, nous nous contenterons de la citer.

125. *Sonnettes à tiraudes.* Le tableau du n° 37 fait voir que l'effet maximum fourni par l'homme employé dans les circonstances de cette machine correspond à un effort de 18$^k$, à une vitesse moyenne de 0$^m$,20 par seconde, et à une durée de travail journalière de 6 heures. Dans les chantiers de construction, la durée du travail est de 9 à 10 heures par jour; mais comme le 1/3 à peu près de ce temps est employé à disposer les appareils, on peut considérer 6 heures comme étant la durée du travail effectif journalier.

La manœuvre de la sonnette à tiraudes étant très-fatigante, on ne bat de suite que 20 à 25 coups de mouton; comme il faut 1′20″ pour cela, qu'ensuite on se repose pendant le même temps, et que le temps perdu est de 20″ environ, chaque volée exige 3 minutes.

A la construction du pont d'Iéna, on travaillait 10 heures par jour, la levée du mouton était de 1$^m$,45, on donnait moyennement 12 volées de chacune 30 coups à l'heure, le mouton pesait 587$^k$, et il était manœuvré par 38 hommes. De ces données, il résulte que l'effort produit par chaque homme était seulement de 15$^k$,45, avec une vitesse moyenne de 0$^m$,145 par seconde; mais cela, en négligeant les frottements de l'axe de la poulie, la roideur de la corde et l'effet de l'obliquité des divers cordons tirés par un aussi grand nombre d'hommes; de plus,

la levée $1^m,45$ étant un peu forte, l'effet produit par les hommes devait être diminué ; il convient que la levée du mouton soit comprise entre $1^m,30$ et $1^m,40$.

Un mouton à enfoncer les pilotis doit peser au moins $300^k$, et sa levée ne doit pas être inférieure à $1^m,10$ ou $1^m,30$ ; il est manœuvré par 18 à 20 hommes. Les moutons du poids de $600^k$ sont manœuvrés par 35 à 40 hommes.

**126.** *Sonnette à déclic.* Pour la sonnette à déclic, la puissance est donnée par la formule

$$P = (Q + q + q')\frac{r'''r'}{r''r}.$$

$P$ puissance agissant sur la manivelle ;
$r$ rayon de la manivelle ;
$r'$ rayon du pignon monté sur l'arbre de la manivelle ;
$r''$ rayon de la roue d'engrenage montée sur l'arbre du treuil, et avec laquelle s'engrène le pignon de rayon $r'$ ;
$r'''$ rayon du treuil ;
$Q$ poids du mouton ;
$q$ résistance due à la roideur de la corde sur la poulie (66) ;
$q'$ résistance due à la roideur de la corde sur le treuil.

On a dans cette formule négligé le frottement des axes et des engrenages, dont on tiendrait facilement compte (64 et 82).

Ce genre de sonnette est surtout avantageux quand il s'agit de manœuvrer de lourds moutons, ceux de 400 à 600 kilog. Toutes choses égales d'ailleurs, le prix de revient du battage des pieux n'est que les 0,65 à 0,70 de celui du battage avec la sonnette à tiraudes.

**127.** *Battage des pieux.* L'expérience prouve que l'enfoncement des pieux est proportionnel au produit de la masse du mouton, plus la masse du pieu, par le carré de la vitesse commune de ces deux masses après le choc, c'est-à-dire à

$$(m + m')u^2 = (m + m')\frac{m^2v^2}{(m + m')^2} = \frac{m^2v^2}{m + m'}. \qquad (98)$$

Ayant $v^2 = 2gh$ (19), l'enfoncement est donc proportionnel à

$$\frac{2gm^2h}{m + m'} = \frac{2gmh}{1 + \frac{m'}{m}}.$$

$u$ vitesse commune au mouton et au pieu après le choc ;
$v$ vitesse du mouton ayant le choc ;
$m$ masse du mouton ;
$m'$ masse du pieu ;
$h$ levée du mouton.

L'expression $\frac{2gm^2h}{m+m'}$ fait voir que, pour une même masse de mouton, l'enfoncement d'un même pieu est proportionnel à la levée du mouton, et l'expression $\frac{2gmh}{1+\frac{m'}{m}}$ montre que, pour un même produit $mh$, l'effet est d'autant plus grand que la masse $m$ est plus grande, et que par conséquent, pour l'économie du travail, qui est représenté par $mh$, il faudra prendre de gros moutons, qu'on élèvera à une hauteur modérée de 2m,50 à 3 ou 4 mètres. Pour les derniers coups frappés sur un pieu, on peut porter la hauteur $h$ à 5 ou 6 mètres.

On considère un pieu comme battu au refus absolu quand il ne s'enfonce plus que de 0m,004 à 0m,005 par volée de 30 coups, ou par coup d'un mouton de sonnette à déclic tombant d'une hauteur de 4 à 5 mètres. Au pont de Neuilly, où les pieux avaient à supporter jusqu'à 52000 kilog. pour un diamètre de 0m,325, on cessait le battage quand l'enfoncement n'était plus que de 0m,0045 par volée de 25 coups d'un mouton tombant de 1m,40.

Lorsque le poids à supporter par les pieux n'est pas considérable, on n'a pas besoin d'arriver à un refus aussi absolu; on peut, quand un pieu ne porte que 7 à 8000 kilog., arrêter le battage quand l'enfoncement n'est plus que de 0m,03 à 0m,04 ou 0m,05 par volée, si toutefois on est sûr que les pieux ont pénétré dans un sol résistant.

128. *Manége.* En supposant que dans un manége une résistance agisse tangentiellement à un tambour horizontal, comme cela a lieu généralement, et que sur l'arbre de ce tambour soit monté un pignon conique qui engrène avec une roue conique montée sur l'arbre vertical du manége, le travail dépensé par la puissance appliquée à l'extrémité des flèches est égal au travail absorbé par la résistance tangentielle au tambour, par le frottement des tourillons de ce tambour, par celui des engrenages et par celui des tourillons de l'arbre vertical, et, pour une révolution du manége, l'équilibre dynamique donne

$$P \times 2\pi R = Q'f \times 2\pi r + Q''f \times \frac{2}{3}\pi r + \frac{R'}{R''}\left[Qf \times 2\pi r' + F \times 2\pi R''' + (Qf \times 2\pi r' + F \times 2\pi R''')f'\pi\left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n'}\right)\right].$$

P puissance agissant à l'extrémité des flèches;
R bras de levier de la puissance, ou longueur des flèches;
Q' somme moyenne des pressions sur les tourillons de l'arbre vertical; on calculera la pression sur chaque tourillon en opérant comme pour le treuil (80); mais comme cette pression varie pour chaque position de la puissance, on prendra une moyenne entre sa plus grande et sa plus petite valeur;
r rayon des tourillons de l'arbre vertical;
f coefficient de frottement, que l'on suppose commun à tous les tourillons ainsi qu'à la face horizontale du pivot inférieur de l'arbre vertical;

$Q''$ pression de la face horizontale du pivot inférieur de l'arbre vertical sur la crapaudine;
$R'$ rayon de la roue conique montée sur l'arbre du manége;
$R''$ rayon du pignon conique monté sur l'axe du tambour;
$R'''$ rayon du tambour plus celui de la corde;
$Q$ somme des pressions des deux tourillons de l'arbre du tambour sur leurs coussinets (80);
$r'$ rayon des tourillons de l'arbre du tambour;
$F$ résistance agissant tangentiellement au tambour; elle se compose du poids élevé, du poids de la corde et de la roideur de cette corde;
$f'$ coefficient de frottement des engrenages;
$n$ nombre de dents du pignon;
$n'$ nombre de dents de la roue;
$P \times 2\pi R$ travail dépensé par la puissance;
$Q' f \times 2\pi r$ travail absorbé par le frottement latéral des pivots de l'arbre du manége;
$Q'' f \times \frac{2}{3}\pi r$ travail absorbé par le frottement de la face horizontale du pivot inférieur de l'arbre du manége;
$\frac{R'}{R''} Qf \times 2\pi r'$ travail absorbé par le frottement des tourillons de l'arbre du tambour;
$\frac{R'}{R''} F \times 2\pi R'''$ travail absorbé par la résistance F agissant tangentiellement au tambour;
$\frac{R'}{R''}(Qf \times 2\pi r' + F \times 2\pi R''') f'\pi \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n'}\right)$ travail absorbé par le frottement des engrenages (82 et 83).

En négligeant tous les frottements, ainsi que le poids et la roideur de la corde, l'équilibre dynamique serait, pour une révolution du manége,

$$P \times 2\pi R = \frac{R'}{R''} F' \times 2\pi R''';$$

d'où l'on tire

$$P = F' \frac{R' R'''}{R R''}.$$

$F'$ poids élevé par la corde qui s'enroule sur le tambour.

Le rayon d'un manége ne doit pas être inférieur à $2^m,50$, et il convient de lui donner de 3 à 4 mètres.

**129.** *Chevaux de manége, soins à leur donner.* Les chevaux courts et trapus conviennent pour le manége. Leur taille, mesurée sur le garrot, peut varier de $1^m,45$ à $1^m,55$.

Un cheval moyen peut produire une traction de 360 kilog. quand il ne prend aucune vitesse; mais quand il marche, la traction qu'il peut produire n'est que le 1/4 environ de cette quantité; on compte sur 80 à 90 kilog. au maximum pour une vitesse moyenne de 1 mèt. par seconde, et pour un temps qui n'est pas trop prolongé. Le plus souvent, les chevaux employés au manége étant fatigués et presque usés, ils ne produi-

sent qu'une traction de 40 à 50 kilog. avec une vitesse de $0^m,90$ à $1^m,00$ par seconde (36 à 39).

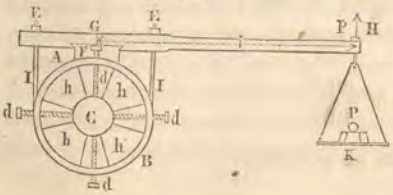
Le travail ne doit pas avoir une durée de plus de 3 heures, et il doit être suivi d'un repos d'une durée au moins égale. Dans un travail continu, le repos doit être de 4 heures pour 2 heures de travail, ce qui fait 8 heures de travail effectif par jour.

Les heures de repos et de pansage des chevaux doivent être régulières. Leur nourriture doit être peu échauffante; aussi ne leur donne-t-on que peu d'avoine. Ils mangent ordinairement, en 24 heures, 10 kilog. de foin et 4 à 5 kilog. de son; mais il serait plus convenable de leur donner 5 kilog. de foin, 5 kilog. de paille et 8 litres d'avoine. Le foin doit être vert, d'une odeur agréable, légèrement aromatique et d'une saveur douce et sucrée, fin, sec et assez flexible; on doit préférer le foin de plaine ou de terrains légèrement inclinés à celui de marais, qui est malsain; il doit, autant que possible, être consommé de 2 mois à 2 ans après la récolte. La paille de froment non barbu est la meilleure comme nourriture; elle doit être nouvelle et de couleur jaune doré. L'avoine doit être pesante, lisse, sans mauvaise odeur, bien nettoyée; sa couleur est indifférente; elle doit peser au moins 42 kilog. l'hectolitre si elle est nouvelle, et 40 kilog. si elle est déjà vieille; elle ne doit être donnée aux chevaux qu'après 4 à 5 mois de récolte.

L'eau doit être donnée aux chevaux à la température de l'atmosphère; celle de pluie ou de rivière est la meilleure; on doit rejeter celle qui est croupie et celle qui ne dissout pas le savon.

**130.** *Frein dynamométrique* (*fig.* 19). Cet appareil sert à déterminer la puissance d'une machine, ou le travail absorbé par les différents appareils que commande l'arbre moteur de cette machine, en le remplaçant par le travail, facile à évaluer, absorbé par un simple frottement produit sur cet arbre.

Fig. 19.




AB bague en fonte, que l'on centre sur l'arbre moteur C au moyen des vis $d$, $d$,..;
$h$, $h$,.. cales fixant la bague AB sur l'arbre C;
E, E écrous servant à serrer la bague AB entre le coussinet F fixé au levier GH, et le lien en fer H;
K plateau de balance fixé à l'extrémité du levier GH.

Supposons qu'après avoir assujetti le levier GH dans une position horizontale, on serre la bague AB entre le coussinet F et le lien H; la vitesse de rotation de l'arbre C ira en diminuant à mesure que le serrage augmentera, et finira par atteindre la vitesse de régime; alors, le travail absorbé par le frottement de la bague AB sera égal au travail ab-

sorbé par les différents appareils que commandait l'arbre C. Si maintenant on rend libre le levier GH, il sera entraîné par le frottement de la bague AB, et tournera avec l'arbre C; mais si on place dans le plateau K un poids P, tel que le levier GH ne soit plus entraîné et ne fasse qu'osciller légèrement de dessus en dessous de la position horizontale, le travail absorbé par le frottement de la bague AB sera encore égal au travail absorbé par la force $P + p$ agissant à l'extrémité du levier $l$, et on aura, pour une révolution de l'arbre C,

$$\mathcal{T}_u = F \times 2\pi r = (P + p)\,2\pi l.$$

$\mathcal{T}_u$ travail transmis par l'arbre moteur C, ou travail absorbé par les différents appareils que commande cet arbre;
F frottement de la bague AB contre le coussinet F et le lien H;
P poids placé dans le plateau K;
$p$ force verticale qu'il faut appliquer au point H pour maintenir le levier GH dans une position horizontale quand il repose en G sur un couteau ordinaire de balancier; on détermine $p$ au moyen d'une balance ou d'un fil flexible passant sur une poulie très-mobile.

Tout est connu dans l'expression $(P + p)\,2\pi l$, on connaît donc $\mathcal{T}_u$.

*Application.* Soit $p = 30$ kil., $P = 100$ kil. et $l = 2^m,50$; il s'agit de déterminer le travail transmis par l'arbre moteur en chevaux-vapeur, sachant que cet arbre fait 40 révolutions par minute.

On a, pour une révolution, en remplaçant les lettres par leurs valeurs,

$$\mathcal{T}_u = (100 + 30) \times 2 \times 3{,}14 \times 2{,}50 = 2041 \text{ kilogrammètres},$$

et pour une seconde,

$$\mathcal{T}_u = 2041\,\frac{40}{60} = 1360^{km},66.$$

La force de la machine est donc de

$$\frac{1360{,}66}{75} = 18{,}14 \text{ chevaux-vapeur.}$$

Quand on n'a pas de bague à sa disposition, et que l'arbre moteur est cylindrique, on peut produire le frottement directement sur l'arbre si son diamètre est suffisant. On remplace quelquefois le lien en fer H par un morceau de bois, que l'on creuse un peu afin qu'il frotte par une plus grande surface.

Les surfaces frottantes doivent avoir une certaine étendue, afin que la pression n'atteigne pas la limite qui pourrait les altérer. Pour une force de 6 à 8 chevaux, il convient que l'arbre ou la bague, faisant 20 à 30 tours par minute, ait $0^m,16$ de diamètre; pour une force de 15 à 25 chevaux, il convient que, pour 15 à 30 tours, ce diamètre varie de

$0^m,30$ à $0^m,40$, et pour une force de 40 à 70 chevaux, ce diamètre doit varier de $0^m,65$ à $0^m,80$ pour une vitesse de 15 à 30 tours par minute.

L'arbre ou la bague doit être parfaitement cylindrique, et on doit avoir soin de roder pendant quelque temps les surfaces frottantes l'une sur l'autre; sans cela le frein n'avancerait sur l'arbre que par secousses, et il ne donnerait que des résultats incertains.

Nous avons eu occasion de faire usage du frein de Prony dans un cas où l'arbre faisait 120 tours par minute. Le frein a fonctionné avec une très-grande régularité; ses oscillations étaient presque insensibles; mais, au moindre arrêt de l'arbre, l'adhésion du frein sur la bague devenait telle, que l'on était obligé de desserrer le frein pour permettre le mouvement. Un filet abondant d'eau de savon noir rafraîchissait et lubréfiait les parties frottantes. La puissance mesurée par le frein était de 2 chevaux et demi.

M. Morin avait déjà constaté, par des expériences faites au Bouchet, que le frein de Prony fonctionne d'une manière favorable à de grandes vitesses.

## ÉCOULEMENT DE L'EAU.

**131** (*Int.*, 1566 à 1576, pour l'équilibre des fluides et des corps plongeants, et pour les moyens de mesurer la pression des fluides). Le *mouvement* d'un fluide est dit *permanent* (le *régime* est *permanent*), lorsque les hauteurs des niveaux, les aires des sections transversales de la masse fluide, et les vitesses du fluide en chacun des points de ces sections sont constantes.

De la nature propre des fluides, les molécules étant contiguës les unes aux autres sans interruption, ce que l'on exprime en disant qu'il y a *continuité du fluide*, il résulte que pour les liquides, que l'on peut considérer comme étant incompressibles (2e partie), il passe dans chaque section le même volume de fluide à chaque instant quand le régime est permanent.

Pour les gaz, la permanence du mouvement exige bien, comme pour les liquides, que le même poids de fluide passe dans chaque tranche dans le même temps; mais les pressions étant variables d'une section à une autre, il en résulte que les volumes écoulés sont variables pour chaque tranche.

**132**. *Hypothèse du parallélisme des tranches.* Afin de pouvoir analyser les phénomènes de l'écoulement des fluides, on a été obligé de supposer le parallélisme des tranches, c'est-à-dire d'admettre que tout volume fluide est composé de tranches très-minces, normales à la direction du mouvement du fluide, se mouvant en restant constamment parallèles à elles-mêmes, conservant toujours le même volume, et ne

faisant que s'élargir ou se rétrécir suivant que le vase dans lequel elles se meuvent s'élargit ou se rétrécit. La vitesse du fluide est supposée être la même en tous les points de chaque section.

On conçoit que ces hypothèses ne sont à peu près réalisées que dans le cas où le fluide se meut dans des vases, des canaux ou des tuyaux de conduite dont la forme continue et régulière ne varie que par degrés insensibles.

**133.** Supposant que les parois du vase sont continues et tellement raccordées avec l'orifice d'écoulement, que l'on puisse, si cela était entièrement possible, considérer le parallélisme des tranches comme réalisé, on prouve théoriquement (*Int.*, 1579), que le niveau restant constant dans le vase, d'où naît la permanence du mouvement, on a

$$v = \sqrt{2gh}, \quad \text{d'où} \quad h = \frac{v^2}{2g}.$$

$v$ vitesse d'écoulement;

$h$ *hauteur génératrice* ou *hauteur de chute;* c'est la hauteur du niveau du liquide dans le vase au-dessus du centre de gravité de l'orifice.

*Écoulement en mince paroi.* Lorsque l'écoulement a lieu en mince paroi, c'est-à-dire quand l'épaisseur de la paroi dans laquelle est pratiqué l'orifice d'écoulement est moindre que la plus petite dimension de l'orifice, et au maximum de $0^m,05$ à $0^m,06$, la vitesse avec laquelle l'eau s'écoule est, comme dans le cas précédent, très-sensiblement donnée par la formule de Toricelli

$$v = \sqrt{2gh}.$$

$v$ peut être appelé *vitesse théorique;* la *vitesse réelle* est moindre, mais seulement de 0,01 à 0,02 de $v$. Cette diminution de vitesse est due au frottement de l'eau contre les parois de l'orifice et à la résistance de l'air.

La formule fait voir que dans les cas précédents d'écoulement de l'eau, la vitesse théorique est celle qu'acquerrait un grave en tombant dans le vide de la hauteur $h$ (19).

**134.** *TABLE des vitesses théoriques* v *correspondant à différentes hauteurs de chute.*

| HAUTEURS de chute. | VITESSES correspondantes. | HAUTEURS de chute. | VITESSES correspondantes. | HAUTEURS de chute. | VITESSES correspondantes. | HAUTEURS de chute. | VITESSES correspondantes. | HAUTEURS de chute. | VITESSES correspondantes. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. |
| 0.001 | 0.140 | 0.42 | 2.870 | 0.92 | 4.248 | 1.42 | 5.278 | 1.92 | 6.138 |
| 0.002 | 0.198 | 0.43 | 2.904 | 0.93 | 4.271 | 1.43 | 5.297 | 1.93 | 6.154 |
| 0.003 | 0.243 | 0.44 | 2.938 | 0.94 | 4.294 | 1.44 | 5.315 | 1.94 | 6.170 |
| 0.004 | 0.280 | 0.45 | 2.971 | 0.95 | 4.317 | 1.45 | 5.333 | 1.95 | 6.186 |
| 0.005 | 0.313 | 0.46 | 3.004 | 0.96 | 4.340 | 1.46 | 5.351 | 1.96 | 6.202 |
| 0.006 | 0.343 | 0.47 | 3.037 | 0.97 | 4.362 | 1.47 | 5.370 | 1.97 | 6.217 |
| 0.007 | 0.370 | 0.48 | 3.069 | 0.98 | 4.384 | 1.48 | 5.388 | 1.98 | 6.232 |
| 0.008 | 0.395 | 0.49 | 3.100 | 0.99 | 4.407 | 1.49 | 5.406 | 1.99 | 6.248 |
| 0.009 | 0.420 | 0.50 | 3.132 | 1.00 | 4.429 | 1.50 | 5.425 | 2.00 | 6.264 |
| 0.01 | 0.443 | 0.51 | 3.163 | 1.01 | 4.451 | 1.51 | 5.443 | 2.01 | 6.279 |
| 0.02 | 0.626 | 0.52 | 3.194 | 1.02 | 4.473 | 1.52 | 5.461 | 2.02 | 6.295 |
| 0.03 | 0.767 | 0.53 | 3.224 | 1.03 | 4.495 | 1.53 | 5.479 | 2.03 | 6.311 |
| 0.04 | 0.886 | 0.54 | 3.253 | 1.04 | 4.517 | 1.54 | 5.496 | 2.04 | 6.326 |
| 0.05 | 0.990 | 0.55 | 3.285 | 1.05 | 4.539 | 1.55 | 5.514 | 2.05 | 6.341 |
| 0.06 | 1.085 | 0.56 | 3.314 | 1.06 | 4.560 | 1.56 | 5.532 | 2.06 | 6.357 |
| 0.07 | 1.172 | 0.57 | 3.344 | 1.07 | 4.582 | 1.57 | 5.550 | 2.07 | 6.372 |
| 0.08 | 1.253 | 0.58 | 3.373 | 1.08 | 4.603 | 1.58 | 5.567 | 2.08 | 6.388 |
| 0.09 | 1.329 | 0.59 | 3.402 | 1.09 | 4.624 | 1.59 | 5.585 | 2.09 | 6.403 |
| 0.10 | 1.401 | 0.60 | 3.431 | 1.10 | 4.645 | 1.60 | 5.603 | 2.10 | 6.418 |
| 0.11 | 1.468 | 0.61 | 3.459 | 1.11 | 4.666 | 1.61 | 5.620 | 2.11 | 6.434 |
| 0.12 | 1.534 | 0.62 | 3.488 | 1.12 | 4.687 | 1.62 | 5.637 | 2.12 | 6.449 |
| 0.13 | 1.597 | 0.63 | 3.516 | 1.13 | 4.708 | 1.63 | 5.655 | 2.13 | 6.464 |
| 0.14 | 1.657 | 0.64 | 3.543 | 1.14 | 4.729 | 1.64 | 5.672 | 2.14 | 6.479 |
| 0.15 | 1.715 | 0.65 | 3.571 | 1.15 | 4.750 | 1.65 | 5.690 | 2.15 | 6.494 |
| 0.16 | 1.772 | 0.66 | 3.598 | 1.16 | 4.770 | 1.66 | 5.707 | 2.16 | 6.510 |
| 0.17 | 1.826 | 0.67 | 3.625 | 1.17 | 4.790 | 1.67 | 5.724 | 2.17 | 6.525 |
| 0.18 | 1.879 | 0.68 | 3.652 | 1.18 | 4.811 | 1.68 | 5.741 | 2.18 | 6.540 |
| 0.19 | 1.931 | 0.69 | 3.679 | 1.19 | 4.831 | 1.69 | 5.758 | 2.19 | 6.555 |
| 0.20 | 1.981 | 0.70 | 3.706 | 1.20 | 4.852 | 1.70 | 5.775 | 2.20 | 6.570 |
| 0.21 | 2.030 | 0.71 | 3.732 | 1.21 | 4.872 | 1.71 | 5.792 | 2.21 | 6.584 |
| 0.22 | 2.078 | 0.72 | 3.758 | 1.22 | 4.892 | 1.72 | 5.809 | 2.22 | 6.599 |
| 0.23 | 2.124 | 0.73 | 3.784 | 1.23 | 4.913 | 1.73 | 5.826 | 2.23 | 6.614 |
| 0.24 | 2.170 | 0.74 | 3.810 | 1.24 | 4.933 | 1.74 | 5.842 | 2.24 | 6.629 |
| 0.25 | 2.215 | 0.75 | 3.836 | 1.25 | 4.953 | 1.75 | 5.859 | 2.25 | 6.644 |
| 0.26 | 2.259 | 0.76 | 3.861 | 1.26 | 4.972 | 1.76 | 5.876 | 2.26 | 6.658 |
| 0.27 | 2.301 | 0.77 | 3.886 | 1.27 | 4.991 | 1.77 | 5.893 | 2.27 | 6.673 |
| 0.28 | 2.344 | 0.78 | 3.911 | 1.28 | 5.011 | 1.78 | 5.909 | 2.28 | 6.688 |
| 0.29 | 2.385 | 0.79 | 3.936 | 1.29 | 5.031 | 1.79 | 5.926 | 2.29 | 6.703 |
| 0.30 | 2.426 | 0.80 | 3.961 | 1.30 | 5.050 | 1.80 | 5.942 | 2.30 | 6.717 |
| 0.31 | 2.466 | 0.81 | 3.986 | 1.31 | 5.069 | 1.81 | 5.959 | 2.31 | 6.732 |
| 0.32 | 2.506 | 0.82 | 4.011 | 1.32 | 5.089 | 1.82 | 5.975 | 2.32 | 6.746 |
| 0.33 | 2.544 | 0.83 | 4.035 | 1.33 | 5.108 | 1.83 | 5.992 | 2.33 | 6.761 |
| 0.34 | 2.582 | 0.84 | 4.059 | 1.34 | 5.127 | 1.84 | 6.008 | 2.34 | 6.775 |
| 0.35 | 2.620 | 0.85 | 4.083 | 1.35 | 5.146 | 1.85 | 6.024 | 2.35 | 6.790 |
| 0.36 | 2.658 | 0.86 | 4.107 | 1.36 | 5.165 | 1.86 | 6.041 | 2.36 | 6.804 |
| 0.37 | 2.694 | 0.87 | 4.131 | 1.37 | 5.184 | 1.87 | 6.057 | 2.37 | 6.819 |
| 0.39 | 2.730 | 0.88 | 4.155 | 1.38 | 5.203 | 1.88 | 6.073. | 2.38 | 6.833 |
| 0.39 | 2.766 | 0.89 | 4.178 | 1.39 | 5.222 | 1.89 | 6.089 | 2.39 | 6.847 |
| 0.40 | 2.801 | 0.90 | 4.202 | 1.40 | 5.241 | 1.90 | 6.105 | 2.40 | 6.862 |
| 0.41 | 2.836 | 0.91 | 4.225 | 1.41 | 5.259 | 1.91 | 6.122 | 2.41 | 6.876 |

| HAUTEURS de chute. | VITESSES correspondantes. | HAUTEURS de chute. | VITESSES correspondantes. | HAUTEURS de chute. | VITESSES correspondantes. | HAUTEURS de chute. | VITESSES correspondantes. | HAUTEURS de chute. | VITESSES correspondantes. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. |
| 2.42 | 6.890 | 2.94 | 7.594 | 3.46 | 8.239 | 3.98 | 8.836 | 4.50 | 9.396 |
| 2.43 | 6.904 | 2.95 | 7.607 | 3.47 | 8.251 | 3.99 | 8.847 | 4.51 | 9.406 |
| 2.44 | 6.919 | 2.96 | 7.620 | 3.48 | 8.263 | 4.00 | 8.858 | 4.52 | 9.417 |
| 2.45 | 6.933 | 2.97 | 7.633 | 3.49 | 8.274 | 4.01 | 8.869 | 4.53 | 9.427 |
| 2.46 | 6.947 | 2.98 | 7.646 | 3.50 | 8.286 | 4.02 | 8.880 | 4.54 | 9.437 |
| 2.47 | 6.961 | 2.99 | 7.659 | 3.51 | 8.298 | 4.03 | 8.892 | 4.55 | 9.448 |
| 2.48 | 6.975 | 3.00 | 7.672 | 3.52 | 8.310 | 4.04 | 8.903 | 4.56 | 9.458 |
| 2.49 | 6.989 | 3.01 | 7.684 | 3.53 | 8.322 | 4.05 | 8.914 | 4.57 | 9.468 |
| 2.50 | 7.003 | 3.02 | 7.697 | 3.54 | 8.333 | 4.06 | 8.925 | 4.58 | 9.479 |
| 2.51 | 7.017 | 3.03 | 7.710 | 3.55 | 8.345 | 4.07 | 8.936 | 4.59 | 9.489 |
| 2.52 | 7.031 | 3.04 | 7.722 | 3.56 | 8.357 | 4.08 | 8.946 | 4.60 | 9.500 |
| 2.53 | 7.045 | 3.05 | 7.735 | 3.57 | 8.369 | 4.09 | 8.957 | 4.61 | 9.510 |
| 2.54 | 7.059 | 3.06 | 7.748 | 3.58 | 8.380 | 4.10 | 8.968 | 4.62 | 9.520 |
| 2.55 | 7.073 | 3.07 | 7.760 | 3.59 | 8.392 | 4.11 | 8.979 | 4.63 | 9.530 |
| 2.56 | 7.087 | 3.08 | 7.773 | 3.60 | 8.404 | 4.12 | 8.990 | 4.64 | 9.541 |
| 2.57 | 7.101 | 3.09 | 7.786 | 3.61 | 8.415 | 4.13 | 9.001 | 4.65 | 9.551 |
| 2.58 | 7.114 | 3.10 | 7.798 | 3.62 | 8.427 | 4.14 | 9.012 | 4.66 | 9.561 |
| 2.59 | 7.128 | 3.11 | 7.811 | 3.63 | 8.439 | 4.15 | 9.023 | 4.67 | 9.572 |
| 2.60 | 7.142 | 3.12 | 7.823 | 3.64 | 8.450 | 4.16 | 9.034 | 4.68 | 9.582 |
| 2.61 | 7.156 | 3.13 | 7.836 | 3.65 | 8.462 | 4.17 | 9.045 | 4.69 | 9.592 |
| 2.62 | 7.169 | 3.14 | 7.849 | 3.66 | 8.474 | 4.18 | 9.055 | 4.70 | 9.602 |
| 2.63 | 7.183 | 3.15 | 7.861 | 3.67 | 8.485 | 4.19 | 9.066 | 4.71 | 9.612 |
| 2.64 | 7.197 | 3.16 | 7.873 | 3.68 | 8.497 | 4.20 | 9.077 | 4.72 | 9.623 |
| 2.65 | 7.210 | 3.17 | 7.886 | 3.69 | 8.508 | 4.21 | 9.088 | 4.73 | 9.633 |
| 2.66 | 7.224 | 3.18 | 7.898 | 3.70 | 8.520 | 4.22 | 9.099 | 4.74 | 9.643 |
| 2.67 | 7.237 | 3.19 | 7.911 | 3.71 | 8.531 | 4.23 | 9.109 | 4.75 | 9.653 |
| 2.68 | 7.251 | 3.20 | 7.923 | 3.72 | 8.543 | 4.24 | 9.120 | 4.76 | 9.663 |
| 2.69 | 7.265 | 3.21 | 7.936 | 3.73 | 8.554 | 4.25 | 9.131 | 4.77 | 9.673 |
| 2.70 | 7.278 | 3.22 | 7.948 | 3.74 | 8.566 | 4.26 | 9.142 | 4.78 | 9.684 |
| 2.71 | 7.291 | 3.23 | 7.960 | 3.75 | 8.577 | 4.27 | 9.152 | 4.79 | 9.694 |
| 2.72 | 7.305 | 3.24 | 7.973 | 3.76 | 8.588 | 4.28 | 9.163 | 4.80 | 9.704 |
| 2.73 | 7.318 | 3.25 | 7.985 | 3.77 | 8.600 | 4.29 | 9.174 | 4.81 | 9.714 |
| 2.74 | 7.332 | 3.26 | 7.997 | 3.78 | 8.611 | 4.30 | 9.185 | 4.82 | 9.724 |
| 2.75 | 7.345 | 3.27 | 8.009 | 3.79 | 8.623 | 4.31 | 9.195 | 4.83 | 9.734 |
| 2.76 | 7.358 | 3.28 | 8.022 | 3.80 | 8.634 | 4.32 | 9.206 | 4.84 | 9.744 |
| 2.77 | 7.372 | 3.29 | 8.034 | 3.81 | 8.645 | 4.33 | 9.217 | 4.85 | 9.754 |
| 2.78 | 7.385 | 3.30 | 8.046 | 3.82 | 8.657 | 4.34 | 9.227 | 4.86 | 9.764 |
| 2.79 | 7.398 | 3.31 | 8.058 | 3.83 | 8.668 | 4.35 | 9.238 | 4.87 | 9.774 |
| 2.80 | 7.411 | 3.32 | 8.070 | 3.84 | 8.679 | 4.36 | 9.248 | 4.88 | 9.784 |
| 2.81 | 7.425 | 3.33 | 8.082 | 3.85 | 8.691 | 4.37 | 9.259 | 4.89 | 9.794 |
| 2.82 | 7.437 | 3.34 | 8.095 | 3.86 | 8.702 | 4.38 | 9.270 | 4.90 | 9.804 |
| 2.83 | 7.451 | 3.35 | 8.107 | 3.87 | 8.713 | 4.39 | 9.280 | 4.91 | 9.814 |
| 2.84 | 7.464 | 3.36 | 8.119 | 3.88 | 8.725 | 4.40 | 9.291 | 4.92 | 9.824 |
| 2.85 | 7.477 | 3.37 | 8.131 | 3.89 | 8.736 | 4.41 | 9.301 | 4.93 | 9.834 |
| 2.86 | 7.490 | 3.38 | 8.143 | 3.90 | 8.747 | 4.42 | 9,312 | 4.94 | 9.844 |
| 2.87 | 7.503 | 3.39 | 8.155 | 3.91 | 8.758 | 4.43 | 9.322 | 4.95 | 9.854 |
| 2.88 | 7.517 | 3.40 | 8.167 | 3.92 | 8.769 | 4.44 | 9.333 | 4.96 | 9.864 |
| 2.89 | 7.530 | 3.41 | 8.179 | 3.93 | 8.780 | 4.45 | 9.343 | 4.97 | 9.874 |
| 2.90 | 7.543 | 3.42 | 8.191 | 3.94 | 8.792 | 4.46 | 9.354 | 4.98 | 9.884 |
| 2.91 | 7.556 | 3.43 | 8.203 | 3.95 | 8.803 | 4.47 | 9.364 | 4.99 | 9.894 |
| 2.92 | 7.569 | 3.44 | 8.215 | 3.96 | 8.814 | 4.48 | 9.375 | 5.00 | 9.904 |
| 2.93 | 7.582 | 3.45 | 8.227 | 3.97 | 8.825 | 4.49 | 9.385 | | |

**133.** *Écoulement à gueule-bée.* Lorsque l'écoulement a lieu à gueule-bée, c'est-à-dire quand les filets fluides se rapprochent des parois de l'orifice, ce qui a lieu quand l'épaisseur de la paroi est égale à une fois ou une fois 1/2 sa plus petite dimension, ou que cet orifice est prolongé d'un ajutage cylindrique ou prismatique d'une longueur égale à 3 ou 4 fois la plus petite dimension de l'orifice, on a, dans les cas ordinaires d'écoulement de l'eau,

$$v' = 0{,}82v = 0{,}82\sqrt{2gh}.$$

$v'$ vitesse réelle avec laquelle l'eau s'écoule;

$v = \sqrt{2gh}$ vitesse théorique d'écoulement (133 et 134).

Pour l'établissement des jets d'eau à l'aide de courts ajutages légèrement convergents (153), on peut supposer $v' = 0{,}87\ v$.

**136.** *Lorsque l'écoulement a lieu par un orifice noyé sur les deux faces*, on a

$$v = \sqrt{2g(h - h')}.$$

$v$ vitesse théorique d'écoulement;

$h$ hauteur du niveau de l'eau dans le vase alimentaire, au-dessus du centre de gravité de l'orifice (*Int.*, 1435 et suivants);

$h'$ hauteur du niveau de l'eau dans le vase alimenté, au-dessus du centre de gravité de l'orifice;

$(h - h')$ différence de niveau de l'eau dans les deux vases, ou hauteur génératrice.

**137.** *Si le liquide qui s'écoule était soumis à une pression étrangère*, à celle d'un piston, par exemple, on aurait

$$v = \sqrt{2g(h + h')}.$$

$v$ vitesse théorique;

$h$ hauteur du niveau du liquide au-dessus du centre de gravité de l'orifice;

$h'$ pression exercée par le piston, évaluée en une hauteur du liquide qui s'écoule.

**138.** *Dépense théorique par un orifice d'écoulement.* En négligeant la diminution de la vitesse et la contraction de la veine à la sortie de l'orifice, ce qui suppose le parallélisme des tranches (132), la dépense, que nous appellerons *dépense théorique*, est

$$Q = sv.$$

Q dépense théorique ou volume d'eau théoriquement écoulé par seconde;

$s$ section de l'orifice; pour un orifice rectangulaire dont $l$ est la largeur et $h$ la hauteur, on a $s = l \times h$; pour un orifice circulaire dont $r$ est le rayon, $s = \pi r^2$ (*Int.*, 634 et 668);

$v = \sqrt{2gh}$ vitesse théorique d'écoulement (133, 134).

**139.** *Dépense effective.* La quantité d'eau qui s'écoule réellement par un orifice se nomme *dépense effective;* elle est toujours moindre que la dépense théorique; on a

$$Q = ksv = ks\sqrt{2gh}.$$

$Q$ dépense effective ;
$sv$ dépense théorique (138) ;
$k$ coefficient, dit *coefficient de contraction*, ou mieux, *coefficient de la dépense* ; c'est le rapport de la dépense effective à la dépense théorique ; sa valeur dépend surtout de la charge sur l'orifice d'écoulement, et de la forme de cet orifice et de sa position par rapport aux parois du vase.

**140.** *Contraction complète de la veine.* Pour que la contraction soit complète, c'est-à-dire pour qu'elle s'opère sur tout le contour de l'orifice, il faut que cet orifice soit éloigné du fond et des parois du vase de au moins une fois 1/2 à 2 fois sa plus petite dimension. C'est pour ce cas et pour des orifices rectangulaires verticaux en mince paroi, que MM. Poncelet et Lesbros ont déterminé les valeurs du coefficient de la dépense consignées dans le tableau suivant (141, *Application*).

1° *Les charges étant la hauteur du niveau, en un point du réservoir où l'eau est parfaitement stagnante, au-dessus de l'arête supérieure de l'orifice.*

| CHARGES sur le sommet des orifices. | Valeurs du coefficient $k$ pour des hauteurs d'orifice de | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0m.20 | 0m.10 | 0m.05 | 0m.03 | 0m.02 | 0m.01 |
| m. | | | | | | |
| 0.000 | » | » | » | » | » | » |
| 0.005 | » | » | » | » | » | 0.705 |
| 0.010 | » | » | 0.607 | 0.630 | 0.660 | 0.701 |
| 0.015 | » | 0.593 | 0.612 | 0.632 | 0.660 | 0.697 |
| 0.020 | 0.572 | 0.596 | 0.615 | 0.634 | 0.659 | 0.694 |
| 0.030 | 0.578 | 0.600 | 0.620 | 0.638 | 0.659 | 0.688 |
| 0.040 | 0.582 | 0.603 | 0.623 | 0.640 | 0.658 | 0.683 |
| 0.050 | 0.585 | 0.605 | 0.625 | 0.640 | 0.658 | 0.679 |
| 0.060 | 0.587 | 0.607 | 0.627 | 0.640 | 0.657 | 0.676 |
| 0.070 | 0.588 | 0.609 | 0.628 | 0.639 | 0.656 | 0.673 |
| 0.080 | 0.589 | 0.610 | 0.629 | 0.638 | 0.656 | 0.670 |
| 0.090 | 0.591 | 0.610 | 0.629 | 0.637 | 0.655 | 0.668 |
| 0.100 | 0.592 | 0.611 | 0.630 | 0.637 | 0.654 | 0.666 |
| 0.120 | 0.593 | 0.612 | 0.630 | 0.636 | 0.653 | 0.663 |
| 0.140 | 0.595 | 0.613 | 0.630 | 0.635 | 0.651 | 0.660 |
| 0.160 | 0.596 | 0.614 | 0.631 | 0.634 | 0.650 | 0.658 |
| 0.180 | 0.597 | 0.615 | 0.630 | 0.634 | 0.649 | 0.657 |
| 0.200 | 0.598 | 0.615 | 0.630 | 0.633 | 0.648 | 0.655 |
| 0.250 | 0.599 | 0.616 | 0.630 | 0.632 | 0.646 | 0.653 |
| 0.300 | 0.600 | 0.616 | 0.629 | 0.632 | 0.644 | 0.650 |
| 0.400 | 0.602 | 0.617 | 0.628 | 0.631 | 0.642 | 0.647 |
| 0.500 | 0.603 | 0.617 | 0.628 | 0.630 | 0.640 | 0.644 |
| 0.600 | 0.604 | 0.617 | 0.627 | 0.630 | 0.638 | 0.642 |
| 0.700 | 0.604 | 0.616 | 0.627 | 0.629 | 0.637 | 0.640 |
| 0.800 | 0.605 | 0.616 | 0.627 | 0.629 | 0.636 | 0.637 |
| 0.900 | 0.605 | 0.615 | 0.626 | 0.628 | 0.634 | 0.635 |
| 1.000 | 0.605 | 0.615 | 0.626 | 0.628 | 0.633 | 0.632 |
| 1.100 | 0.604 | 0.614 | 0.625 | 0.627 | 0.631 | 0.629 |
| 1.200 | 0.604 | 0.614 | 0.624 | 0.626 | 0.628 | 0.626 |

| CHARGES sur le sommet des orifices. | Valeurs du coefficient $k$ pour des hauteurs d'orifice de | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0m.20 | 0m.10 | 0m.05 | 0m.03 | 0m.02 | 0m.01 |
| m. | | | | | | |
| 1.300 | 0.603 | 0.613 | 0.622 | 0.624 | 0.625 | 0.622 |
| 1.400 | 0.603 | 0.612 | 0.621 | 0.622 | 0.622 | 0.618 |
| 1.500 | 0.602 | 0.611 | 0.620 | 0.620 | 0.619 | 0.615 |
| 1.600 | 0.602 | 0.611 | 0.618 | 0.618 | 0.617 | 0.613 |
| 1.700 | 0.602 | 0.610 | 0.617 | 0.616 | 0.615 | 0.612 |
| 1.800 | 0.601 | 0.609 | 0.615 | 0.615 | 0.614 | 0.612 |
| 1.900 | 0.601 | 0.608 | 0.614 | 0.613 | 0.612 | 0.611 |
| 2.000 | 0.601 | 0.607 | 0.613 | 0.612 | 0.612 | 0.611 |
| 3.000 | 0.601 | 0.603 | 0.606 | 0.608 | 0.610 | 0.609 |
| 2° *Les charges étant la hauteur du niveau de l'eau, immédiatement au-dessus de l'orifice, au-dessus de l'arête supérieure de cet orifice.* | | | | | | |
| 0.000 | 0.619 | 0.667 | 0.713 | 0.766 | 0.783 | 0.795 |
| 0.005 | 0.597 | 0.630 | 0.668 | 0.725 | 0.750 | 0.778 |
| 0.010 | 0.595 | 0.618 | 0.642 | 0.687 | 0.720 | 0.762 |
| 0.015 | 0.594 | 0.615 | 0.639 | 0.674 | 0.707 | 0.745 |
| 0.020 | 0.594 | 0.614 | 0.638 | 0.668 | 0.697 | 0.729 |
| 0.030 | 0.593 | 0.613 | 0.637 | 0.659 | 0.685 | 0.708 |
| 0.040 | 0.593 | 0.612 | 0.636 | 0.654 | 0.678 | 0.695 |
| 0.050 | 0.593 | 0.612 | 0.636 | 0.651 | 0.672 | 0.686 |
| 0.060 | 0.594 | 0.613 | 0.635 | 0.647 | 0.668 | 0.681 |
| 0.070 | 0.594 | 0.613 | 0.635 | 0.645 | 0.665 | 0.677 |
| 0.080 | 0.594 | 0.613 | 0.635 | 0.643 | 0.662 | 0.675 |
| 0.090 | 0.595 | 0.614 | 0.634 | 0.641 | 0.659 | 0.672 |
| 0.100 | 0.595 | 0.614 | 0.634 | 0.640 | 0.657 | 0.669 |
| 0.120 | 0.596 | 0.614 | 0.633 | 0.637 | 0.655 | 0.665 |
| 0.140 | 0.597 | 0.614 | 0.632 | 0.636 | 0.653 | 0.661 |
| 0.160 | 0.597 | 0.615 | 0.631 | 0.635 | 0.651 | 0.659 |
| 0.180 | 0.598 | 0.615 | 0.631 | 0.634 | 0.650 | 0.657 |
| 0.200 | 0.599 | 0.615 | 0.630 | 0.633 | 0.649 | 0.656 |
| 0.250 | 0.600 | 0.616 | 0.630 | 0.632 | 0.646 | 0.653 |
| 0.300 | 0.601 | 0.616 | 0.629 | 0.632 | 0.644 | 0.651 |
| 0.400 | 0.602 | 0.617 | 0.629 | 0.631 | 0.642 | 0.647 |
| 0.500 | 0.603 | 0.617 | 0.628 | 0.630 | 0.640 | 0.645 |
| 0.600 | 0.604 | 0.617 | 0.627 | 0.630 | 0.638 | 0.643 |
| 0.700 | 0.604 | 0.616 | 0.627 | 0.629 | 0.637 | 0.640 |
| 0.800 | 0.605 | 0.616 | 0.627 | 0.629 | 0.636 | 0.637 |
| 0.900 | 0.605 | 0.615 | 0.626 | 0.628 | 0.634 | 0.635 |
| 1.000 | 0.605 | 0.615 | 0.626 | 0.628 | 0.633 | 0.632 |
| 1.100 | 0.604 | 0.614 | 0.625 | 0.627 | 0.631 | 0.629 |
| 1.200 | 0.604 | 0.614 | 0.624 | 0.626 | 0.628 | 0.626 |
| 1.300 | 0.603 | 0.613 | 0.622 | 0.624 | 0.625 | 0.622 |
| 1.400 | 0.603 | 0.612 | 0.621 | 0.622 | 0.622 | 0.618 |
| 1.500 | 0.602 | 0.611 | 0.620 | 0.620 | 0.619 | 0.615 |
| 1.600 | 0.602 | 0.611 | 0.618 | 0.618 | 0.617 | 0.613 |
| 1.700 | 0.602 | 0.610 | 0.617 | 0.616 | 0.615 | 0.612 |
| 1.800 | 0.601 | 0.609 | 0.615 | 0.615 | 0.614 | 0.612 |
| 1.900 | 0.601 | 0.608 | 0.614 | 0.613 | 0.613 | 0.611 |
| 2.000 | 0.601 | 0.607 | 0.614 | 0.612 | 0.612 | 0.611 |
| 3.000 | 0.601 | 0.603 | 0.606 | 0.608 | 0.610 | 0.609 |

Lorsque la hauteur de l'orifice dépasse $0^m,20$, on peut prendre pour coefficients de la dépense ceux de la hauteur $0^m,20$.

Les coefficients du tableau précédent s'appliquent à un orifice de forme quelconque, sans angle rentrant, pourvu que la plus petite dimension de l'orifice soit la hauteur du tableau, et ils s'appliquent aux orifices noyés comme à ceux qui débouchent à l'air libre; seulement, dans ce dernier cas, la hauteur génératrice est la différence des niveaux de l'eau au-dessus des deux faces de l'orifice (136); ainsi on a

$$Q = ks\sqrt{2g(h-h')}.$$

**141.** *Contraction incomplète.* Lorsqu'une partie du contour de l'orifice fait prolongement aux parois du vase, la contraction est supprimée sur cette partie, et, par suite, elle est incomplète. Dans ce cas, d'après les expériences de Bidone, on a :

1° Pour les orifices rectangulaires,

$$k' = k\left(1 + 0{,}152\,3\,\frac{n}{p}\right);$$

2° Pour les orifices circulaires,

$$k' = k\left(1 + 0{,}127\,9\,\frac{n}{p}\right).$$

$k'$ coefficient de la dépense dans le cas de la contraction incomplète ;
$k$ coefficient de la dépense dans le cas de la contraction complète ; sa valeur est celle indiquée au tableau du n° 140 ;
$n$ portion du contour de l'orifice sur laquelle la contraction est supprimée ;
$p$ périmètre total de l'orifice.

*Application.* Quel est le volume d'eau qui s'écoule en une seconde par un orifice rectangulaire de $0^m,20$ de largeur et $0^m,10$ de hauteur, la charge au-dessus de l'arête supérieure de l'orifice, mesurée en un point où l'eau est stagnante, étant $0^m,95$, et la contraction de la veine étant complète?

Faisant $k = 0{,}615$, $s = 0{,}20 \times 0{,}10$ et $h = 0{,}95 + 0{,}05 = 1{,}00$ dans la formule du n° 139, on a

$$Q = 0{,}615 \times 0{,}20 \times 0{,}10\sqrt{2 \times 9{,}808\,8 \times 1} = 0^{m.\,cu.},545.$$

Si la contraction de la veine était supprimée sur un côté, si par exemple l'arête inférieure de l'orifice était dans le prolongement du fond du réservoir, dans l'application précédente il faudrait faire

$$k = 0{,}615\left(1 + 0{,}152\,3\,\frac{0{,}20}{0{,}60}\right) = 0{,}615 \times 1{,}050\,8 = 0{,}646.$$

Il est évident que si l'on avait calculé la dépense $0^{m.cu.},545$ pour le cas précédent, on aurait pour ce dernier cas

$$Q = 0,545 \times 1,050\,8 = 0^{m.cu.},572.$$

**142.** *Lorsque l'orifice est prolongé à l'intérieur du vase par un tuyau assez court pour que l'écoulement n'ait pas lieu à gueule-bée* (135), ce que l'on reconnaît à la simple vue, le coefficient de la dépense est, d'après les expériences de Borda et celles de Bidone, $k = 0,50$.

On voit que cette disposition, que l'on rencontre quelquefois dans les appareils hydrauliques et dans les jets d'eau, est très-désavantageuse à la dépense.

**143.** *La largeur de l'orifice paraît avoir quelque influence sur la dépense.* Quoique l'on ait peu d'expériences à cet égard, on peut admettre, pour un orifice de $1^m,50$ de largeur, avec des charges sur le sommet variant de $0^m,05$ à $0^m,20$ et une contraction complète, les valeurs suivantes du coefficient de la dépense :

| Hauteur de l'orifice. | m 0.05 | m 0.06 | m 0.07 | m 0.08 | m 0.09 | m 0.10 | m 0.12 | m 0.14 | m 0.16 | m 0.18 | m 0.20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Coefficient $k$. . . . | 0.728 | 0.708 | 0.695 | 0.687 | 0.682 | 0.679 | 0.675 | 0.675 | 0.675 | 0.675 | 0.675 |

**144.** *Vanne d'écluse.* Pour une vanne d'écluse, dont le seuil est en général très-rapproché du fond du radier d'amont, le coefficient de la dépense est 0,625, que la vanne soit ou non noyée sur les deux faces.

*Application.* Quelle est la dépense par seconde d'une vanne de $1^m,20$ de largeur et de $0^m,20$ de levée, la charge sur le centre de l'orifice étant $2^m,50$?

Le tableau du n° 134 donnant $7^m,003$ pour vitesse d'écoulement, la dépense est

$$0,625 \times 1,20 \times 0,20 \times 7,003 = 1^{m.cu.},050.$$

**145.** *Orifices voisins.* Pour deux vannes très-rapprochées, comme celles des portes busquées d'une écluse à sas, on prenait pour coefficient de la dépense 0,55; mais des expériences faites par M. Castel ont démontré que le voisinage de deux ou de trois orifices ne change pas le coefficient de la dépense; il conviendra donc, comme dans le cas précédent, de le faire égal à 0,625.

**146.** *Vannes inclinées.* Pour des vannes inclinées, comme celles des roues à la Poncelet, dont la face inférieure et les deux faces latérales sont dans le prolongement des parois du réservoir, on a $k = 0,74$ pour une inclinaison de 1 de base sur 2 de hauteur, et $k = 0.80$ pour une inclinaison de 1 de base sur 1 de hauteur. La section $s$ de la vanne (138)

se prend égale au produit de la largeur par la hauteur de l'ouverture, cette hauteur étant mesurée verticalement et non suivant l'inclinaison de la vanne. (Pour la charge à prendre dans le cas des roues à la Poncelet, consulter ce genre de roues.)

**147.** *Orifices en déversoir.* Pour les orifices en déversoir, la dépense effective est donnée par la formule

$$Q = kLH\sqrt{2gH}.$$

Q volume d'eau écoulé par seconde;
$k$ coefficient de la dépense; d'après MM. Poncelet et Lesbros, dans les cas ordinaires d'application, $k = 0{,}405$;
L largeur du déversoir;
H hauteur du niveau de l'eau au-dessus du seuil du déversoir; cette hauteur se mesure en un point où le dénivellement ne se fait plus sentir, c'est-à-dire à 3 ou 4 mètres en amont du déversoir.

*TABLEAU des valeurs de* k *pour différentes hauteurs* H, *d'après MM. Poncelet et Lesbros.*

(L'orifice avait $0^m.20$ de largeur; il était placé à $0^m.54$ du fond et à $1^m.74$ environ de chacune des parois verticales; ses bords étaient à arêtes vives.)

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Valeurs de H. . . | m 0.01 | m 0.02 | m 0.03 | m 0.04 | m 0.06 | m 0.08 | m 0.10 | m 0.15 | m 0.20 | m 0.22 |
| Valeurs de $k$. . . | 0.424 | 0.417 | 0.412 | 0.407 | 0.401 | 0.397 | 0.395 | 0.393 | 0.390 | 0.385 |

Le coefficient moyen 0,405 devient 0,443 environ, quand le déversoir a la même largeur que le canal d'arrivée, et que la profondeur de celui-ci n'excède pas quatre fois la charge sur le seuil du déversoir.

**148.** H étant la hauteur du niveau de l'eau dans le réservoir au-dessus du seuil du déversoir, et $h$ l'épaisseur de la lame d'eau, mesurée sur l'arête intérieure du seuil même du déversoir, on a $H = 1{,}178h$ quand la largeur du déversoir est les 4/5 de celle du réservoir, et $H = 1{,}25h$ quand ces deux largeurs sont égales. Ces rapports servent à calculer H quand on ne peut déterminer sa valeur par l'expérience, ce qui arrive, par exemple, quand le canal est couvert en amont du déversoir.

**149.** *Pour un déversoir formé par la vanne inclinée d'une roue de côté, ayant la même largeur que le canal d'arrivée, et arrondie à sa partie supérieure*, cas qui se présente souvent dans la pratique, et qui n'a pas été suffisamment étudié, M. Morin rapporte les résultats suivants, obtenus au Bouchet. La vanne avait $2^m,017$ de largeur et $0^m,08$ d'épaisseur; elle était inclinée à 65°; son bord supérieur était à vive arête du côté d'amont et arrondi du côté d'aval.

| Valeurs de H. . | m 0.04 | m 0.05 | m 0.06 | m 0.07 | m 0.08 | m 0.09 | m 0.10 | m 0.12 | m 0.14 | m 0.16 | m 0.18 | m 0.20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Coefficient $k$. . | 0.264 | 0.313 | 0.355 | 0.390 | 0.418 | 0.437 | 0.448 | 0.460 | 0.467 | 0.472 | 0.477 | 0.482 |

Pour les petites charges, l'eau mouillait et suivait la surface de la vanne, au lieu que pour les plus fortes, la veine fluide se détachait complétement; c'est ce qui explique la grande variation de $k$.

Il conviendrait d'étendre ces expériences, qui fourniraient des résultats très-utiles pour la pratique.

**150.** *Déversoirs incomplets.* Il peut arriver que l'eau ait en aval du déversoir un niveau supérieur au seuil de ce déversoir. Dans ce cas, on calcule approximativement la dépense en considérant l'orifice du déversoir comme composé de deux parties : l'une supérieure au niveau de l'eau en aval, et dont on calcule le débit comme pour un déversoir dont la charge est égale à la profondeur du canal d'arrivée, c'est-à-dire en faisant $k = 0{,}443$ (147); l'autre inférieure à ce niveau, et dont la dépense se calcule comme celle d'un orifice noyé sur les deux faces, en prenant pour charge la différence des niveaux de l'eau en amont et en aval du déversoir (140).

**151.** *Orifices en déversoir prolongés d'un coursier peu incliné.* Dans ce cas, les charges étant toujours mesurées en un point où le dénivellement ne se fait plus sentir, on peut prendre pour coefficient de la dépense les valeurs suivantes :

| Charges sur le seuil du déversoir. . | m 0.20 | m 0.15 | m 0.10 | m 0.06 | m 0.04 | m 0.03 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Valeurs du coefficient $k$. . . . . | 0.32 | 0.31 | 0.30 | 0.28 | 0.26 | 0.23 |

**152.** *Orifices circulaires garnis d'ajutages cylindriques de même diamètre.* Dans ce cas, il résulte des expériences faites par Eytelwein avec une série de tubes de $0^m{,}026$ de diamètre, que le coefficient de la dépense (139) varie avec le rapport de la longueur de l'ajutage à son diamètre, et qu'il est respectivement pour les rapports

| 1 et au-dessous, | 2 à 3, | 12, | 24, | 36, | 43, | 60 : |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,62, | 0.82, | 0.77, | 0.73, | 0.68, | 0.63, | 0.60. |

**153.** *Orifices circulaires garnis d'ajutages coniques convergents*, c'est-à-dire d'ajutages dont le diamètre va en diminuant à partir de la paroi du vase. Dans ce cas, on prend pour section de l'orifice celle de l'extrémité de l'ajutage, et pour charge génératrice, la charge sur le

centre de cette extrémité. M. Castel, en opérant sur des ajutages dont la longueur était égale à 2,6 fois le diamètre à l'extrémité, a trouvé pour coefficient de la dépense (139) et pour coefficient de la vitesse (133 et 135), les résultats du tableau suivant, qui varient, comme on le voit, avec l'angle de convergence que font entre elles les génératrices de l'ajutage.

| ANGLES de convergence. | COEFFICIENTS de la dépense. | COEFFICIENTS de la vitesse. | ANGLES de convergence. | COEFFICIENTS de la dépense. | COEFFICIENTS de la vitesse. |
|---|---|---|---|---|---|
| 0° 0′ | 0.829 | 0.830 | 13° 24′ | 0.946 | 0.962 |
| 1 36 | 0.866 | 0.866 | 14 28 | 0.941 | 0.966 |
| 3 10 | 0.895 | 0.894 | 16 36 | 0.938 | 0.971 |
| 4 10 | 0.912 | 0.910 | 19 28 | 0.924 | 0.970 |
| 5 26 | 0.924 | 0.920 | 21 0 | 0.918 | 0.971 |
| 7 52 | 0.929 | 0.931 | 23 0 | 0.913 | 0.974 |
| 8 58 | 0.934 | 0.942 | 29 58 | 0.896 | 0.975 |
| 10 20 | 0.938 | 0.950 | 40 20 | 0.869 | 0.980 |
| 12 4 | 0.942 | 0.955 | 48 50 | 0.847 | 0.984 |

Les résultats de ce tableau ont été obtenus avec une série d'ajutages dont le diamètre à l'extrémité était $0^m,0155$. Une autre série dont le diamètre était $0^m,020$ a donné des résultats de si peu supérieurs à ces premiers, que l'on peut supposer que la différence provient d'une légère erreur dans l'évaluation des diamètres.

Ces expériences, qui ont été faites sous des charges qui ont varié de $0^m,215$ à $3^m,030$, prouvent que les coefficients de la dépense et de la vitesse sont indépendants de la charge.

**154.** *Ajutages coniques divergents.* Le tableau suivant donne les résultats obtenus par Venturi, en opérant sous une charge constante de $0^m,88$. Les tubes portaient à leur extrémité adaptée au vase une embouchure convergente à peu près de la forme de la veine contractée. Cette embouchure avait $0^m,0406$ de diamètre près du vase, et $0^m,0338$ au point d'où ses génératrices commençaient à diverger.

| LONGUEURS des ajutages. | ANGLES de divergence. | COEFFICIENTS de la dépense. | LONGUEURS des ajutages. | ANGLES de divergence. | COEFFICIENTS de la dépense. |
|---|---|---|---|---|---|
| m | | | m | | |
| 0.111 | 3° 30′ | 0.93 | 0.059 | 5° 44′ | 0.82 |
| 0.334 | 4 38 | 1.21 | 0.264 | 10 16 | 0.91 |
| 0.460 | 4 38 | 1.21 | 0.045 | 10 16 | 0.91 |
| 0.460 | 4 38 | 1.34 | 0.045 | 14 14 | 0.61 |
| 0.476 | 5 44 | 1.02 | | | |

Venturi conclut de ses expériences que la dépense est maximum quand

la longueur de l'ajutage est égale à 9 fois le diamètre de la plus petite base, et que l'angle de divergence que font entre elles les génératrices est de 5° 6′. Avec ces proportions, dit l'auteur, la dépense est égale à 2,4 fois la dépense du même orifice en mince paroi, ou à 1,46 fois la dépense théorique.

**135.** *Orifices accompagnés d'un coursier.* Bossut et, plus tard, MM. Poncelet et Lesbros, ont constaté que la présence d'un coursier plus ou moins incliné n'a pas une influence sensible sur la dépense d'une vanne, si la hauteur génératrice n'est pas au-dessous de

| | | | |
|---|---|---|---|
| 0m.50 à 0m.60 | pour des orifices de | 0m.15 à 0m.20 | de hauteur, |
| 0m.30 à 0m.40 | id. | 0m.10 | id. |
| 0m.20 | id. | 0m.05 et au-dessous, | id. |

Pour des charges inférieures, le coursier a une légère influence sur la dépense, et, dans ces cas, qui ne se présentent presque jamais dans la pratique, on peut considérer les valeurs du tableau suivant comme des coefficients moyens pour les dispositions ordinaires de coursiers.

| HAUTEUR de l'orifice. | CHARGE sur le centre de l'orifice. | COEFFICIENT moyen. | HAUTEUR de l'orifice. | CHARGE sur le centre de l'orifice. | COEFFICIENT moyen. |
|---|---|---|---|---|---|
| m | m | | m | m | |
| 0.20 | 0.40 | 0.588 | 0.05 | 0.20 | 0.625 |
| *id.* | 0.24 | 0.563 | *id.* | 0.11 | 0.605 |
| *id.* | 0.12 | 0.484 | *id.* | 0.05 | 0.488 |
| 0.10 | 0.16 | 0.591 | *id.* | 0 04 | 0.439 |
| *id.* | 0.11 | 0.563 | 0.03 | 0.20 | 0 638 |
| *id.* | 0.09 | 0.517 | *id.* | 0.06 | 0.604 |
| *id.* | 0.06 | 0.462 | | | |

On pourra calculer la vitesse moyenne de l'eau dans le coursier, à une distance de l'orifice égale à 1,5 ou 2 fois la plus petite dimension de cet orifice, à l'aide de la formule suivante, donnée par Navier, pour le cas des orifices garnis d'ajutages prismatiques,

$$U = \sqrt{\frac{2gH}{1 + \left(\frac{1}{k} - 1\right)^2}}.$$

U vitesse moyenne cherchée;
H hauteur du niveau de l'eau au-dessus du centre de gravité de l'orifice;
$k$ coefficient de la dépense applicable à l'orifice.

Supposant $k = 0.62$, la formule donne $U = 0.855\sqrt{2gH}$, au lieu de $0.82\sqrt{2gH}$, que donne l'expérience pour les ajutages cylindriques (135).

En négligeant le frottement de l'eau contre les parois du coursier, on a

$$u = \sqrt{2g(h + h')}.$$

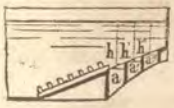
$u$ vitesse moyenne à l'extrémité du coursier;

$h = \frac{U^2}{2g}$ hauteur due à la vitesse à l'origine du coursier (133);

$h'$ pente totale du coursier.

**136.** *Orifices garnis d'ajutages-directeurs* (*fig.* 20). Dans les roues à augets qui prennent l'eau en dessous du sommet, il arrive souvent que l'orifice de la vanne est garni d'un certain nombre d'ajutages qui dirigent l'eau dans les augets. Dans ce cas, on considère séparément chaque ajutage découvert, et on prend, dans le calcul de la dépense (139), pour largeur de la vanne, celle de l'ajutage; pour levée de la vanne, la plus petite distance $a$, ou $a'$, ou $a''$..... des diaphragmes qui forment l'ajutage considéré; pour hauteur génératrice, la hauteur $h$, ou $h'$, ou $h''$..... du niveau de l'eau au-dessus du centre de gravité de la plus petite distance $a$, ou $a'$, ou $a''$.....; enfin, pour coefficient de la dépense, 0.75. La somme des dépenses des différents orifices est la dépense totale.

Fig. 20.




**137.** Lorsqu'une vanne est accompagnée d'une buse pyramidale appelée *bec-de-cane*, comme cela a encore lieu pour distribuer l'eau sur la roue dans quelques anciennes usines, dans le calcul de la dépense (139), on prend pour ouverture de la vanne la section de l'extrémité du bec-de-cane; pour charge génératrice, la charge sur le centre de l'extrémité du bec, et pour coefficient de la dépense, 0,98; cette valeur est tirée des résultats de trois expériences de M. Lespinasse, sur une buse de $2^m,923$ de longueur, ayant $0^m,731$ sur $0^m,975$ à sa grande base, et $0^m,135$ sur $0^m,190$ à la petite. D'après des expériences de MM. Piobert et Tardy, il convient de faire ce coefficient égal à 0,864 quand les buses sont garnies intérieurement de cadres en bois ou en fer.

**138.** *Ecoulement de l'eau lorsque le niveau est variable sur une ou sur les deux faces de l'orifice d'écoulement, et que le vase qui se vide, ainsi que celui qui se remplit, ont des sections horizontales constantes en tous les points de leur profondeur.*

Ce qui va suivre s'applique principalement aux écluses des canaux de navigation.

Nous avons vu que la dépense en une seconde par un orifice est, lorsque le niveau reste constant (139),

$$Q = ksv = ks\sqrt{2gh}.$$

Le temps nécessaire pour que la dépense soit égale à la capacité de la partie de bassin située au-dessus de l'orifice est alors, pour un bassin prismatique,

$$t = \frac{Ah}{Q} = \frac{Ah}{ks\sqrt{2gh}}. \qquad (a)$$

Q dépense par seconde;
$k$ coefficient de la dépense;
$s$ section de l'orifice d'écoulement;
$t$ durée de l'écoulement, en secondes;
A section horizontale du bassin;
$h$ hauteur du niveau de l'eau au-dessus de l'orifice d'écoulement;
$Ah$ capacité de la partie de bassin située au-dessus de l'orifice d'écoulement, ou dépense pour le temps $t$.

Lorsque le vase se vide sans qu'il reçoive de liquide, la durée $t$ de la vidange de la partie supérieure à l'orifice est double de ce qu'elle est, pour la même dépense, lorsque le niveau de l'eau reste constant; ainsi, pour le cas de la formule $(a)$, on a

$$t' = 2t = \frac{2Ah}{ks\sqrt{2gh}} = \frac{2A}{ks\sqrt{2g}}\sqrt{h}. \qquad (b)$$

Le temps que met le niveau pour descendre d'une quantité $h - h'$ est

$$T = \frac{2A}{ks\sqrt{2g}}\left(\sqrt{h} - \sqrt{h'}\right). \qquad (c)$$

T durée de l'écoulement en secondes;
$h$ charge sur l'orifice au commencement du temps T;
$h'$ charge sur l'orifice après le temps T.

Si l'on suppose $h' = 0$ dans la formule précédente, c'est-à-dire, que le niveau baisse de toute la hauteur $h$, on obtient, comme cela devait avoir lieu, l'expression $(b)$; ainsi on a

$$T = \frac{2A}{ks\sqrt{2g}}\sqrt{h} = t'.$$

De la formule $(c)$ on tire, pour le temps d'écoulement T, l'abaissement de niveau

$$h - h' = \frac{Tks\sqrt{2g}}{A}\left(\sqrt{h} - \frac{Tks\sqrt{2g}}{4A}\right). \qquad (d)$$

La dépense Q', pour le temps T, est donc

$$Q' = (h - h')A = Tks\sqrt{2g}\left(\sqrt{h} - \frac{Tks\sqrt{2g}}{4A}\right). \qquad (e)$$

Lorsque l'orifice d'écoulement est noyé sur les deux faces, les niveaux restant constants, la dépense est la même que pour l'écoulement à l'air libre, sous une charge égale à la différence $h - h'$ des charges sur les deux faces de l'orifice; ainsi on a, en représentant par Q la dépense par seconde,

$$Q = ks\sqrt{2g(h-h')}. \qquad \text{(136 et suivants.)}$$

Supposant que le niveau reste constant dans le bassin supérieur, et que le bassin inférieur ne perde pas d'eau, le temps qu'il faudra pour que le niveau s'établisse dans les deux bassins sera égal au temps (*b*), nécessaire pour la vidange à l'air libre du bassin qui se remplit, placé dans les mêmes circonstances de charges; ainsi on aura

$$t' = \frac{2A}{ks\sqrt{2g}}\sqrt{h}.$$

$t'$ temps nécessaire à l'établissement du niveau;
A section horizontale du bassin qui se remplit;
$h$ différence de niveau du liquide dans les deux bassins au commencement du temps $t'$.

Le temps nécessaire pour que le niveau s'élève d'une quantité $h-h'$, est aussi égal au temps (*c*), nécessaire pour un abaissement de niveau égal à cette élévation si le bassin se vidait dans les mêmes circonstances de charges; ainsi on a

$$T = \frac{2A}{ks\sqrt{2g}}(\sqrt{h}-\sqrt{h'}).$$

T temps que met le niveau à s'élever de la quantité $h-h'$;
$h$ différence de niveau du liquide dans les deux vases au commencement du temps T;
$h'$ différence de niveau du liquide dans les deux vases à la fin du temps T.

La valeur de $h-h'$ est encore égale à celle fournie par la formule (*d*), et la dépense est aussi égale à celle donnée par la formule (*e*).

Si l'on suppose que l'orifice d'écoulement étant noyé sur les deux faces, le niveau soit variable dans les deux bassins, c'est-à-dire que l'un des bassins se vide pour remplir l'autre, comme cela a lieu pour deux sas contigus dans un canal de navigation, le temps nécessaire pour que le niveau s'établisse dans les deux bassins est

$$T = \frac{2AB\sqrt{h-h'}}{ks\sqrt{2g}(A+B)}.$$

T durée de l'établissement du niveau;
$h-h'$ différence de niveau du liquide dans les deux bassins quand on ouvre la vanne;
A et B sections horizontales des deux bassins.

Cette formule fait voir que T est le même pour une égale valeur de $h-h'$, que A soit la section du bassin qui se vide, et B celle de celui qui se remplit, ou que B soit la section du premier et A celle du second.

Il peut encore arriver que l'orifice d'écoulement ne soit noyé sur les

deux faces que pendant une partie du temps de remplissage. Alors, pour avoir ce temps, on le divise en deux parties : l'une correspondant au remplissage de la portion de bassin inférieure à l'orifice d'écoulement, et que l'on calcule facilement d'après ce qui vient d'être dit, soit que le bassin supérieur se vide ou conserve un niveau constant; l'autre correspondant au remplissage de la portion de bassin supérieure à l'orifice d'écoulement, et que l'on calcule encore facilement, soit que le bassin supérieur se vide ou conserve un niveau constant.

**139.** M. Darcy, pour jauger la source du Rosoir (*Fontaines publiques de la ville de Dijon*, par M. Darcy), s'est servi d'un barrage en planches, et, afin que l'orifice fût à mince paroi, tout le contour était garni, du côté d'amont, de feuilles de fer-blanc appliquées contre les planches, qu'elles dépassaient de 3 à 4 centimètres.

M. Darcy a opéré d'abord sur un orifice complétement noyé du côté d'amont, puis sur un orifice en déversoir, en élevant la planche supérieure jusqu'au-dessus du niveau de l'eau. Dans le premier cas, la dépense théorique a été calculée au moyen de la formule

$$Q' = \frac{2}{3} l\sqrt{2g}\left(h_1\sqrt{h_1} - h\sqrt{h}\right),$$

et pour avoir la dépense effective Q, on a multiplié Q' par le coefficient de contraction 0,62. Cette formule donne très-sensiblement les mêmes résultats que celle du n° 139.

$l$ largeur de l'orifice; elle est sensiblement restée constante et égale à $0^m,535$ ;
$h_1$ charge sur l'arête inférieure de l'orifice; elle a varié de $0^m,142$ à $0^m,375$ ;
$h$ charge sur l'arête supérieure de l'orifice; elle a été de $0^m,0825$ et $0^m,335$ pour les valeurs extrêmes précédentes de $h_1$.

Lorsque l'orifice était en déversoir, la dépense théorique était calculée par la formule

$$Q' = lH\sqrt{2g}H = 4,4292 lH\sqrt{H},$$

et la dépense effective Q s'obtenait en multipliant Q' par le coefficient de contraction 0,40, trouvé par MM. Poncelet et Lesbros, pour des orifices dont les parois sont tout à fait minces, et non d'une épaisseur de $0^m,03$ (147). Ainsi on avait

$$Q = 1,77 lH\sqrt{H}.$$

$l$ largeur du déversoir;
H charge d'eau sur le seuil du déversoir, mesurée à quelque distance en amont de celui-ci.

## COURS D'EAU.

**160.** *Cours d'eau à section constante et à pente uniforme.* Lorsque le régime des eaux est établi, c'est-à-dire quand le mouvement de l'eau est uniforme, on a

$$Q = Sv, \quad \text{d'où l'on tire} \quad v = \frac{Q}{S}.$$

Q dépense ou volume d'eau écoulé par seconde (1);
S section du cours d'eau;
$v$ vitesse moyenne d'écoulement de l'eau.

On a aussi, d'après de Prony,

$$I = \frac{P}{S}(av + bv^2). \qquad (a)$$

I pente par mètre; elle est égale à la différence de niveau de deux points de la surface de l'eau, divisée par la distance de ces deux points mesurée suivant l'axe du cours d'eau;
S section transversale du cours d'eau;
$v$ vitesse moyenne du cours d'eau;
P périmètre mouillé; c'est le contour de la section S, diminué de la largeur du canal à la surface de l'eau;
$a = 0{,}000\,044\,4499$, soit 0,000 0444, coefficient numérique constant;
$b = 0{,}000\,309\,3140$, soit 0,000 309, *id.*

De Prony, qui a le premier donné la formule précédente, a déterminé les valeurs de $a$ et $b$, en discutant les résultats de trente et une expériences faites par Dubuat, sur des canaux factices et des rivières dont la section a varié de $0^{mc},011$ à $29^{mc},00$, et la vitesse moyenne de $0^{m},12$ à $0^{m},88$.

Eytelwein, en suivant la même marche que de Prony, mais en ajoutant aux résultats de Dubuat ceux obtenus depuis par MM. Brünings, Woltmann et Funck, pour des canaux et des rivières dont la section fluide a varié de $0^{mc},014$ à $2604^{mc},00$, et la vitesse de $0^{m},124$ à $2^{m},42$, a conclu, de quatre-vingt-onze résultats, que l'on devait faire, dans la formule de Prony, $a = 0{,}000\,024\,2651$, soit 0,000 024, et $b = 0{,}000\,365\,5430$, soit 0,000 365.

La formule de Prony, modifiée par les nouvelles valeurs de $a$ et $b$ d'Eytelwein, convient mieux au cas des grandes rivières; mais elle ne s'applique pas également bien aux quatre-vingt-onze expériences discutées par Eytelwein. Les résultats de Dubuat, notamment, sont beaucoup mieux représentés par la formule de Prony (voir le tableau suivant).

On appelle *rayon moyen*, le quotient de la section transversale S

d'un cours d'eau par le périmètre mouillé P; ainsi, en le représentant par R, on a

$$R = \frac{S}{P};$$

et la formule de Prony donne, en remplaçant $a$ et $b$ par leurs valeurs,

$$RI = 0{,}000\,044\,4v + 0{,}000\,309v^2;$$

d'où l'on tire (*Int.*, 488)

$$v = \sqrt{0{,}005\,163 + 3233{,}428RI} - 0{,}071\,85,$$

ou à peu près

$$v = 56{,}86\sqrt{RI} - 0{,}072.$$

De ces formules on tirera la valeur de $v$, connaissant I et R, ou celle de la pente I pour obtenir une vitesse $v = \frac{Q}{S}$.

La valeur de R dépend de celle de la section S et de la forme de cette section, forme généralement déterminée par des exigences de localités. Si le canal est en bois ou en maçonnerie, on peut faire les parois verticales, et il convient que la largeur soit égale au double de la profondeur d'eau, afin de rendre le périmètre mouillé et par suite la résistance des parois le plus petits possibles. Pour les canaux en terre, les parois sont en talus, et la largeur au fond varie de quatre à six fois la profondeur de l'eau.

M. de Saint-Venant, de la discussion des résultats qui ont servi à de Prony et Eytelwein pour établir la formule précédente, et de quelques autres consignés comme les premiers dans le tableau suivant, a conclu la formule monome

$$RI = 0{,}000\,401\,02v^{\frac{21}{11}}, \quad \text{d'où} \quad v = 60{,}158\,(RI)^{\frac{11}{21}},$$

ou approximativement

$$RI = 0{,}000\,4v^{\frac{21}{11}} \quad \text{et} \quad v = 60\,(RI)^{\frac{11}{21}}.$$

*TABLEAU calculé par M. de Saint-Venant avec les formules précédentes prises avec le plus d'exactitude* (ANNALES DES MINES, 4e série, t. XX).

| EXPÉRIMENTATEURS. | VALEURS de RI. | VITESSES | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | observées. | De Prony. | Eytelwein. | Saint-Venant |
| Dubuat. . . . . | 0.000 008 0 | 0.124 | 0.104 | 0.118 | 0.129 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 012 8 | 0.154 | 0.144 | 0.157 | 0.165 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 018 5 | 0.161 | 0.179 | 0.194 | 0.200 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 021 4 | 0.172 | 0.201 | 0.211 | 0.215 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 028 6 | 0.212 | 0.241 | 0.249 | 0.254 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 023 9 | 0.242 | 0.216 | 0.225 | 0.228 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 031 6 | 0.249 | 0.256 | 0.263 | 0.264 |
| Woltmann. . . . | 0.000 031 7 | 0.263 | 0.256 | 0.263 | 0.265 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 036 1 | 0.281 | 0.277 | 0.282 | 0.283 |
| Dubuat. . . . . | 0.000 039 7 | 0.281 | 0.293 | 0.298 | 0.298 |
| Woltmann. . . . | 0.000 044 6 | 0.301 | 0.315 | 0.318 | 0.317 |
| Dubuat. . . . . | 0.000 044 3 | 0.320 | 0.313 | 0.316 | 0.315 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 042 7 | 0.327 | 0.306 | 0.310 | 0.309 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 035 2 | 0.334 | 0.273 | 0.279 | 0.279 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 051 3 | 0.348 | 0.341 | 0.343 | 0.341 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 049 6 | 0.353 | 0.336 | 0.337 | 0.335 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 047 3 | 0.367 | 0.326 | 0.329 | 0.326 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 056 9 | 0.384 | 0.360 | 0.360 | 0.357 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 069 5 | 0.421 | 0.401 | 0.404 | 0.399 |
| Woltmann. . . . | 0.000 065 0 | 0.430 | 0.392 | 0.390 | 0.386 |
| Dubuat. . . . . | 0.000 112 6 | 0.495 | 0.536 | 0.523 | 0.514 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 095 9 | 0.548 | 0.490 | 0.480 | 0.473 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 137 6 | 0.549 | 0.599 | 0.581 | 0.571 |
| Funk (en petit). . | 0.000 156 0 | 0.606 | 0.644 | 0.623 | 0.612 |
| Dubuat. . . . . | 0.000 315 7 | 0.633 | 0.940 | 0.896 | 0.882 |
| Bonati. . . . . | 0.000 166 4 | 0.637 | 0.665 | 0.642 | 0.631 |
| Dubuat. . . . . | 0.000 161 3 | 0.687 | 0.654 | 0.632 | 0.621 |
| Bonati. . . . . | 0.000 210 8 | 0.735 | 0.757 | 0.727 | 0.714 |
| Dubuat. . . . . | 0.000 328 3 | 0.736 | 0.790 | 0.758 | 0.745 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 184 1 | 0.745 | 0.703 | 0.677 | 0.665 |
| Brünings. . . . . | 0.000 187 0 | 0.766 | 0.709 | 0.683 | 0.671 |
| Dubuat. . . . . | 0.000 254 8 | 0.771 | 0.838 | 0.802 | 0.789 |
| Funk. . . . . | 0.000 221 2 | 0.772 | 0.777 | 0.745 | 0.732 |
| Dubuat. . . . . | 0.000 308 3 | 0.772 | 0.930 | 0.885 | 0.872 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 247 6 | 0.776 | 0.826 | 0.791 | 0.777 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 219 0 | 0.783 | 0.773 | 0.742 | 0.728 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 241 2 | 0.816 | 0.814 | 0.780 | 0.766 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 252 2 | 0.863 | 0.834 | 0.798 | 0.784 |
| Brünings. . . . . | 0.000 256 6 | 0.880 | 0.842 | 0.806 | 0.792 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 330 4 | 0.917 | 0.964 | 0.923 | 0.904 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 419 1 | 0.918 | 1.094 | 1.038 | 1.000 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 392 9 | 0.938 | 1.058 | 1.004 | 0.989 |
| Funk. . . . . | 0.000 403 5 | 0.975 | 1.052 | 1.019 | 1.003 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 421 5 | 1.011 | 1.074 | 1.036 | 1.027 |
| Brünings. . . . . | 0.000 690 1 | 1.035 | 1.423 | 1.341 | 1.329 |
| Funk. . . . . | 0.000 416 6 | 1.039 | 1.061 | 1.034 | 1.020 |
| Brünings. . . . . | 0.000 660 9 | 1.057 | 1.392 | 1.312 | 1.299 |
| École romaine. . | 0.000 395 6 | 1.092 | 1.041 | 1.007 | 0.993 |
| | 0.000 372 5 | 1.115 | 1.028 | 0.977 | 0.962 |

| EXPÉRIMENTATEURS. | VALEURS de RI. | VITESSES | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | observées. | De Prony. | Eytelwein. | Saint-Venant. |
| Brünings. . . . . | 0.000 580 9 | 1.122 | 1.300 | 1.228 | 1.214 |
| École romaine. . | 0.000 462 7 | 1.146 | 1.156 | 1.095 | 1.080 |
| Brünings. . . . . | 0.000 564 2 | 1.210 | 1.280 | 1.210 | 1.196 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 464 8 | 1.218 | 1.130 | 1.094 | 1.080 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 579 0 | 1.225 | 1.292 | 1.225 | 1.212 |
| Funk. . . . . | 0.000 817 5 | 1.226 | 1.557 | 1.463 | 1.435 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 717 4 | 1.239 | 1.453 | 1.368 | 1.356 |
| Bonati. . . . . | 0.000 705 2 | 1.269 | 1.440 | 1.356 | 1.344 |
| Brünings. . . . . | 0.000 358 0 | 1.274 | 1.006 | 0.957 | 0.942 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 446 9 | 1.293 | 1.102 | 1.073 | 1.058 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 650 7 | 1.299 | 1.380 | 1.302 | 1.289 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 655 9 | 1.304 | 1.386 | 1.306 | 1.294 |
| Funk. . . . . | 0.000 759 0 | 1.337 | 1.496 | 1.408 | 1.397 |
| Bidone. . . . . | 0.000 706 6 | 1.366 | 1.442 | 1.358 | 1.345 |
| Funk. . . . . | 0.000 774 9 | 1.417 | 1.513 | 1.423 | 1.445 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 800 0 | 1.450 | 1.542 | 1.446 | 1.436 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 757 5 | 1.467 | 1.494 | 1.407 | 1.391 |
| Brünings. . . . . | 0.000 837 4 | 1.474 | 1.575 | 1.481 | 1.471 |
| Funk. . . . . | 0.000 942 2 | 1.490 | 1.675 | 1.572 | 1.564 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 718 2 | 1.502 | 1.411 | 1.369 | 1.357 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 850 8 | 1.506 | 1.588 | 1.493 | 1.483 |
| *Id.* . . . . . | 0.001 133 5 | 1.509 | 1.844 | 1.728 | 1.723 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 956 8 | 1.575 | 1.682 | 1.585 | 1.577 |
| Bidone. . . . . | 0.000 934 3 | 1.586 | 1.663 | 1.566 | 1.557 |
| Funk. . . . . | 0.000 948 1 | 1.597 | 1.652 | 1.552 | 1.543 |
| *Id.* . . . . . | 0.001 023 0 | 1.600 | 1.442 | 1.640 | 1.633 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 948 1 | 1.608 | 1.680 | 1.576 | 1.569 |
| *Id.* . . . . . | 0.001 244 5 | 1.626 | 1.935 | 1.812 | 1.810 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 963 1 | 1.663 | 1.694 | 1.590 | 1.582 |
| Bidone. . . . . | 0.001 084 9 | 1.692 | 1.802 | 1.690 | 1.684 |
| Funk. . . . . | 0.001 074 5 | 1.735 | 1.793 | 1.681 | 1.676 |
| *Id.* . . . . . | 0.001 164 7 | 1.757 | 1.870 | 1.752 | 1.748 |
| *Id.* . . . . . | 0.001 248 9 | 1.820 | 1.938 | 1.815 | 1.813 |
| *Id.* . . . . . | 0.001 321 0 | 1.869 | 1.996 | 1.868 | 1.866 |
| *Id.* . . . . . | 0.001 498 0 | 1.919 | 2.130 | 1.991 | 1.994 |
| *Id.* . . . . . | 0.001 561 3 | 1.993 | 2.176 | 2.034 | 2.038 |
| *Id.* . . . . . | 0.001 604 0 | 2.008 | 2.206 | 2.062 | 2.067 |
| *Id.* . . . . . | 0.001 629 7 | 2.035 | 2.224 | 2.078 | 2.084 |
| *Id.* . . . . . | 0.001 570 0 | 2.040 | 2.182 | 2.039 | 2.043 |
| *Id.* . . . . . | 0.001 639 3 | 2.101 | 2.232 | 2.085 | 2.091 |
| *Id.* . . . . . | 0.001 730 9 | 2.119 | 2.205 | 2.141 | 2.151 |
| *Id.* . . . . . | 0.001 962 6 | 2.294 | 2.442 | 2.284 | 2.298 |
| *Id.* . . . . . | 0.002 238 9 | 2.409 | 2.611 | 2.442 | 2.462 |
| *Id.* . . . . . | 0.002 164 2 | 2.416 | 2.574 | 2 400 | 2.418 |

**161.** *Relations entre la vitesse moyenne, la vitesse maxima à la surface et la vitesse au fond d'un cours d'eau.* Des expériences de Dubuat (160), de Prony a conclu la formule

$$\frac{v}{V} = \frac{V + 2.37}{V + 3.15} \qquad (a)$$

$v$ vitesse moyenne (160);

V vitesse à la surface, prise au point où se trouve le fil de l'eau, c'est-à-dire au point où elle est la plus grande; cette vitesse maxima correspond généralement à la plus grande profondeur de l'eau.

De cette formule on conclut que, pour les valeurs de V:

$$0^m,10,\ 0^m,50,\ 1^m,00,\ 1^m,50,\ 2^m,00,\ 2^m,50,\ 3^m,00,\ 3^m,50,\ 4^m,00,$$

on a respectivement $\frac{v}{V} =$

$$0{,}760,\ 0{,}786,\ 0{,}812,\ 0{,}832,\ 0{,}848,\ 0{,}862,\ 0{,}873,\ 0{,}883,\ 0{,}891.$$

Dans la pratique, pour des vitesses à la surface comprises entre $0^m,20$ et $1^m,50$, on peut supposer $v = \frac{4}{5}\,V = 0{,}8V$, ou $V = 1{,}25v$.

La formule précédente donne pour $v$ des valeurs trop considérables lorsqu'il s'agit de grands cours d'eau; ainsi, des expériences directes faites sur la Seine ont donné $v = 0{,}62V$, et d'autres exécutées par M. Raucourt sur la Newa ont fourni $v = 0{,}75V$.

Le filet doué de la vitesse moyenne a été habituellement trouvé un peu au-dessous de la moitié, vers les 3/5, de la profondeur.

Des ingénieurs allemands ont trouvé que le rapport entre la vitesse moyenne de tous les filets rencontrés par une même verticale et la vitesse à la partie supérieure de la verticale, variait de 0,88 à 0,90; des expériences faites sur le Rhin, par M. Defontaine, ont donné moyennement 0,88 pour ce rapport.

Dubuat a conclu de ses expériences (160) que l'on avait, en représentant par U la vitesse au fond d'un canal,

$$U = 2v - V. \qquad (b)$$

d'où l'on tire, en faisant $V = 1{,}25v$,

$$U = 0{,}75v, \quad \text{ou} \quad v = 1{,}33U.$$

Pour l'établissement d'un canal, on se donnera la vitesse U, telle que les parois ne soient pas dégradées; on en conclura la vitesse moyenne $v$ qu'il ne faudra pas dépasser, et, à l'aide de l'une des formules du n° 160, on déterminera les quantités qui sont encore inconnues.

*TABLEAU des valeurs maximum de* U *pour différentes natures de sols.*

| | m. |
|---|---|
| Terres détrempées, brunes | 0,076 |
| Argiles tendres | 0,152 |
| Sables | 0,305 |
| Graviers | 0,609 |
| Cailloux | 0,614 |
| Pierres cassées, silex | 1,220 |
| Cailloux agglomérés ou poudings, schistes tendres | 1,520 |
| Roches en couches | 1,830 |
| Roches dures | 3,050 |

162. *Jaugeage des rivières.* La formule de Prony

$$v = \sqrt{0{,}005\,163 + 3\,233{,}428\mathrm{RI}} - 0{,}071\,85,$$

ou simplement

$$v = 56{,}86\sqrt{\mathrm{RI}} - 0{,}072, \qquad (160)$$

peut servir à jauger non-seulement un cours d'eau à section constante et à pente uniforme sur toute sa longueur, mais aussi un cours d'eau quelconque, pourvu que l'on puisse trouver sur son parcours une certaine longueur, 400 mètres si c'est possible, dont la section soit constante et la pente uniforme. Un profil en travers donne la section transversale du cours d'eau et le périmètre mouillé, et divisant la section par le périmètre, on a le rayon moyen R; un nivellement donne la pente totale de la partie régulière du cours d'eau, et cette pente, divisée par la longueur du développement de l'axe de cette partie régulière, donne la pente I par mètre. Substituant R et I dans la formule précédente, on en conclut la vitesse $v$, laquelle, multipliée par la section transversale fournie par le profil, donne la dépense.

Si la section du cours d'eau n'est pas tout à fait constante, ce qui arrive souvent pour les cours d'eau naturels, sur la longueur à peu près régulière considérée, on fait un certain nombre de profils en travers du cours d'eau, ce qui donne le même nombre de sections, dont on prend la moyenne en divisant leur somme par leur nombre; on prend également la moyenne des périmètres mouillés, aussi donnés par les profils, et divisant la section moyenne par le périmètre moyen, on a le rayon moyen R. On détermine ensuite la pente I, puis la vitesse moyenne $v$ et la dépense comme dans le cas précédent.

Si le profil en travers d'un cours d'eau présentait une grande profondeur sur une certaine étendue, et s'étendait loin avec une très-faible profondeur, pour appliquer la formule de Prony, il conviendrait de considérer le cours d'eau comme formé de deux, l'un correspondant à la partie profonde, et l'autre à la partie de faible profondeur; par là, chaque profil partiel serait convexe, et on rentrerait dans les cas qui ont servi à l'établissement de la formule de Prony.

On peut encore jauger une rivière en déterminant directement la vitesse maxima à la surface. On jette dans le fil de l'eau un flotteur cylindrique en bois de chêne, qui s'immerge presque complétement; on compte, à l'aide d'une montre à secondes, le temps que met le flotteur pour parcourir une certaine distance, que l'on a encore eu soin de prendre la plus grande possible et au point où le cours d'eau est le plus régulier, et divisant l'espace par le temps, on a la vitesse. On a soin de répéter une dizaine de fois l'expérience, et en prenant la moyenne des vitesses trouvées pour toutes les expériences, on obtient une vitesse que l'on peut considérer comme étant la vitesse à la surface, laquelle, multipliée par 0,8, donne la vitesse moyenne (161). On détermine ensuite la section du cours d'eau par un simple profil, si la partie parcourue par le flotteur a partout la même section, ou par un certain nombre, comme il a déjà été indiqué dans ce numéro, si la section n'est pas tout à fait constante, et la vitesse moyenne, multipliée par la section, donne la dépense. On a soin de jeter le flotteur dans le courant un peu au-dessus du point duquel on commence à compter le temps, afin que quand il arrive à ce point, il possède déjà la vitesse du courant. Au lieu d'un seul flotteur, on peut en jeter plusieurs à la fois dans le courant; mais il convient encore, malgré cela, de répéter un certain nombre de fois l'expérience.

Il est évident qu'au lieu d'employer la formule de Prony pour jauger un cours d'eau, on peut faire usage de celle d'Eytelwein ou de celle de M. de Saint-Venant (160).

**165.** *Mouvement de l'eau dans un canal rectangulaire à surface lisse ou enduit en ciment de Pouilly.* Les eaux de la source du Rosoir sont amenées à Dijon à l'aide d'un aqueduc en maçonnerie, voûté en plein cintre, qui a $0^m,90$ sous clef et $0^m,60$ de largeur. Cette largeur est réduite à $0^m,54$ par un enduit en ciment de Pouilly, qui s'élève jusqu'au-dessus du niveau de l'eau. Le fond est tout à fait plat (159). En amenant les eaux dans le réservoir de la porte Guillaume, on a pu mesurer avec une grande exactitude les volumes $0^m,0874$, $0^m,0669$, $0^m,0446$ et $0^m,0236$ écoulés par seconde dans les diverses expériences, et à l'aide d'un flotteur, que l'on observait par des regards disposés de 100 en 100 mètres, on a pu mesurer la vitesse maximum. Des résultats obtenus, M. Darcy a déduit les formules suivantes, qui établissent les relations entre les vitesses, la pente et les dimensions de la section de la veine fluide :

$$1° \qquad \left(0{,}000\,25 + \frac{0{,}000\,0147}{H}\right) v^2 = \frac{LH}{L + 2H} \times I,$$

$$2° \qquad \left(0{,}000\,175\,1 + \frac{0{,}000\,005\,75}{H}\right) V^2 = \frac{LH}{L + 2H} \times I.$$

$v$ vitesse moyenne de l'eau dans l'aqueduc;
$V$ vitesse maximum à la surface;

I pente par mètre ;
H profondeur de l'eau ;
L largeur uniforme de la veine fluide.

Dans la presque totalité des cas, H à une valeur assez grande pour qu'on puisse négliger les seconds termes entre parenthèses dans les formules précédentes, qui deviennent alors

$$0{,}000\,25v^2 = \frac{LH}{L+2H} \times I, \quad \text{d'où} \quad v = 63{,}25\sqrt{\frac{LH}{L+2H} \times I}$$

et

$$0{,}000\,175\,1V^2 = \frac{LH}{L+2H} \times I, \quad \text{d'où} \quad V = 75{,}53\sqrt{\frac{LH}{L+2H} \times I}.$$

De ces valeurs de $v$ et V, on déduit

$$\frac{v}{V} = \frac{63{,}25}{75{,}53} = 0{,}836\,9.$$

**164.** *Considérations sur le mouvement uniforme des eaux courantes.* (Extrait des *Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux courantes*, par M. Dupuit, ingénieur en chef des ponts et chaussées.)

Le mouvement d'un fluide dans un canal donne lieu à deux résistances : l'adhérence du fluide aux parois du canal, la cohésion des molécules entre elles.

Ces deux résistances ont pour propriétés communes : d'être proportionnelles aux surfaces en contact, d'être indépendantes de la pression, de croître pour l'adhérence avec la vitesse absolue, pour la cohésion avec le rapport entre la vitesse relative des couches et leur épaisseur.

Ces propriétés, que mettent en évidence les expériences les plus simples, distinguent complétement ces deux résistances du frottement des solides sur les solides, qui ne dépend ni de la vitesse ni de la superficie du contact, et croît au contraire avec la pression (59). Cependant l'adhérence du liquide au solide est une force du même ordre que le frottement ordinaire et lui est comparable; on pourrait déterminer l'épaisseur d'une feuille de tôle qui éprouverait en glissant sur une surface solide la même résistance qu'y rencontrerait une couche d'eau de même surface. Quant à la cohésion des molécules entre elles, c'est une espèce d'affinité chimique d'un ordre complétement différent, et qui agit avec une intensité incomparablement plus grande que l'adhérence. C'est là une distinction essentielle qu'on ne trouve établie dans aucun traité d'hydrodynamique.

Il y a de nouvelles expériences à faire pour attribuer à l'adhésion et à la cohésion leur part dans les phénomènes où elles agissent avec des intensités diverses; pour établir, au lieu des formules empiriques dont on se sert aujourd'hui, des formules rationnelles fondées sur les propriétés réelles de ces deux résistances si distinctes.

M. Dupuit prouve théoriquement que la formule (*b*) n° 161, vérifie le phénomène, du moins avec une approximation suffisante pour la pratique.

*Dans le cas d'une section rectangulaire d'une largeur indéfinie*, cette formule est

$$v = \frac{2V + U}{3}, \qquad (1)$$

formule qui donne pour $v$ une valeur qui ne diffère de celle donnée par (*b*) que de la quantité $\frac{1}{6}(V - U)$, et cette différence ne tient qu'au cas particulier du rectangle de largeur indéfinie, ou de parois latérales sans frottement.

La formule (*a*), n° 161, au contraire, ne vérifie pas le phénomène. De la formule précédente, on conclut

$$\frac{v}{V} = 0{,}67 + \frac{1}{3}\frac{U}{V}.$$

Ce qui fait voir que le rapport de la vitesse moyenne à la vitesse de la surface est toujours compris entre 0,67 et 1. Dans le plus grand nombre de cas, U étant environ la moitié de la vitesse à la surface, ce rapport s'écarte peu de 0,80, coefficient ordinairement employé. Ce n'est que sur ce seul point qu'il y a accord avec les expériences de Dubuat.

La formule précédente peut se mettre sous la forme

$$\frac{v}{V} = 0{,}67 + \frac{1}{3}\frac{1}{1 + CHU} = 0{,}67 + \frac{1}{3}\frac{1}{1 + CH^{\frac{3}{2}}I^{\frac{1}{2}}}.$$

C constante;
H profondeur du canal;
I pente par mètre.

Ainsi, le rapport $\frac{v}{V}$ diminue quand la vitesse du fond et la profondeur du canal augmentent; il est constant lorsque le produit $H^{\frac{3}{2}}I^{\frac{1}{2}}$ ou HU est lui-même constant; ce qui explique comment, dans certaines circonstances, l'expérience a pu vérifier la loi de Dubuat, qui suppose ce rapport indépendant de U (*Int.*, 479).

D'après ce qui précède, M. Dupuit fait remarquer que la vitesse U étant donnée par une équation de la forme

$$HI = aU + bU^2, \qquad (2)$$

on aura les vitesses $v$ et V par les formules

$$v = U + \frac{H^2 I}{3\varepsilon}, \tag{3}$$

et

$$V = U + \frac{H^2 I}{2\varepsilon}, \tag{4}$$

$\varepsilon$ étant un coefficient.

Ce qui résout le problème d'une manière complète pour la pratique, car on peut déterminer une quelconque des quantités U, $v$, V, H, I, en fonction des deux autres.

La profondeur à laquelle a lieu la vitesse moyenne est

$$z = \frac{1}{3} H\sqrt{3} = 0.58\,H. \tag{5}$$

C'est ce que vérifie l'expérience (161).

*Pour un tuyau cylindrique*, les formules (1), (2), (3), (4), (5) deviennent respectivement :

$$v = \frac{U + V}{2},$$

$$\frac{1}{2} RI = aU + bU^2,$$

$$v = U + \frac{R^2 I}{8\varepsilon},$$

$$V = U + \frac{R^2 I}{4\varepsilon},$$

$$\rho = \frac{1}{2} R\sqrt{2} = 0.70\,R.$$

R rayon du tuyau ;

$\rho$ rayon de la couche fluide cylindrique qui possède la vitesse moyenne $v$.

Ces équations s'appliquant à un demi-cylindre comme à un tuyau entier, on pourrait observer à la surface la variation des vitesses à partir du centre, ce qui est plus facile que dans l'intérieur du liquide.

*Pour un canal rectangulaire d'une largeur limitée*, en appelant :

V la vitesse au milieu de la surface du canal ;
U la vitesse au milieu du fond du canal ;
$V_1$ et $U_1$ les vitesses en haut et en bas des parois verticales ;
H la profondeur uniforme de l'eau,
L la demi-largeur du canal ;
$w$ la vitesse variable des filets contigus au fond du canal ;
$w_1$ la vitesse variable des filets contigus à la paroi verticale ;
$v_1$ la vitesse d'un filet situé à la profondeur $z$ et à la distance $y$ du milieu du canal ;

on a d'abord les trois équations de condition

$$I = 2\varepsilon \frac{V-U}{H^2} + 2\varepsilon \frac{V-V_1}{L^2}, \qquad (1')$$

$$\int_0^L (aw + bw^2)dy = 2\varepsilon \frac{V-U}{H} L, \qquad (2')$$

$$\int_0^H (aw_1 + bw_1^2)dz = 2\varepsilon \frac{V-V_1}{L} H, \qquad (3')$$

qui permettront de calculer V, $V_1$, U, qui sont les seules quantités inconnues qui entrent dans la valeur de

$$v_1 = V - \frac{V-U}{H^2} z^2 - \frac{V-V_1}{L^2} y^2. \qquad (a)$$

Les variables $w$ et $w_1$ s'exprimeraient en $y$ et en $z$, en faisant successivement $y = L$ et $z = H$ dans cette dernière formule, ce qui donnerait

$$w = U - \frac{V-V_1}{L^2} y^2 \quad \text{et} \quad w_1 = V_1 - \frac{V-U}{H^2} z^2.$$

Pour $z = H$ et $y = L$, la formule $(a)$ donne

$$v_1 = U_1 = U + V_1 - V.$$

La vitesse moyenne est donnée par l'équation

$$v = \frac{V + V_1 + U}{3} = \frac{2V + U_1}{3} = \frac{2(V_1 + U) - U_1}{3}.$$

Pour $H = L$, ce qui arrive pour un tuyau ou pour un canal ouvert dont la profondeur est la moitié de la largeur, on a

$$V_1 = U \quad \text{et} \quad V = U = \frac{H^2 I}{4\varepsilon}.$$

La vitesse moyenne est alors

$$v = \frac{V + 2U}{3}.$$

De l'équation (1'), on tire le coefficient

$$\varepsilon = \frac{\frac{1}{2} L^2 H^2 I}{(V-U)L^2 + (V-V_1)H^2}, \quad \text{et pour } H = L, \quad \varepsilon = \frac{H^2 I}{4(V-U)}.$$

Supposant la résistance à la paroi proportionnelle à la vitesse moyenne sur cette paroi, ce qui fournit une approximation plus que suffisante pour la pratique, les trois équations de condition (1'), (2'), (3') se simplifient et deviennent :

$$\frac{V-U}{H^2} + \frac{V-V_1}{L^2} = \frac{I}{2\varepsilon}, \qquad (1'')$$

$$E\left(V_1 - \frac{V-U}{3}\right) = 2\varepsilon \frac{V-V_1}{L}, \qquad (2'')$$

$$E\left(U - \frac{V-V_1}{3}\right) = 2\varepsilon \frac{V-U}{H}. \qquad (3'')$$

Équations du premier degré en V, $V_1$ et U, qui serviront à calculer ces trois quantités. Dans ces équations, en négligeant $a$, ce qui est presque toujours permis, on a

$$E = \sqrt{\frac{bLHI}{L+H}}.$$

Telles sont les formules qu'il faudrait appliquer dans le cas des canaux d'expérience, dont la hauteur et la largeur ne diffèrent pas beaucoup.

Si le canal avait une largeur très-considérable par rapport à la hauteur, on appliquerait les formules du rectangle à largeur indéfinie, dans lesquelles on remplacerait I par $I\frac{L}{L+H.}$ Ainsi, l'effet de la paroi latérale se réduit à diminuer l'inclinaison dans le rapport de L à L + H.

*Pour une section trapézoïdale*, il convient de substituer aux parois inclinées des parois verticales menées par le milieu des premières, de manière à ne pas changer la section du canal.

*Pour une section quelconque*, jusqu'à de nouvelles expériences, M. Dupuit conseille les méthodes et les chiffres suivants, comme les plus propres à donner un résultat exact dans les problèmes relatifs au mouvement uniforme.

Une section étant donnée, il faut d'abord, si cela est nécessaire, la diviser en autant de parties qu'il y a de vitesses sensiblement différentes à la paroi, et appliquer à chacune de ces parties le procédé de calcul suivant.

On supposera à $a$ et $b$ les valeurs données par de Prony pour les tuyaux de conduite, en les augmentant un peu (165), et on déterminera la vitesse à la paroi à l'aide de la formule

$$RI = aU + bU^2 = 0.000\,018U + 0.000\,36U^2.$$

Pour avoir la vitesse moyenne, on posera, suivant que la section affectera la forme circulaire ou rectangulaire, dans laquelle on peut négliger l'influence des parois verticales, ou rectangulaire large par rapport à la hauteur

$$v = U + \frac{1}{8\varepsilon} R^2 I, \quad v = U + \frac{1}{4\varepsilon} H^2 I, \quad v = U + \frac{1}{4\varepsilon}\frac{L}{L+H} H^2 I.$$

Il ne reste donc qu'à donner une valeur au coefficient $\varepsilon$ pour en déduire un résultat numérique. M. Sonnet propose, d'après des expériences de Couplet, de prendre $\frac{1}{\varepsilon} = 3\,200$; mais ces expériences ayant été faites dans des tuyaux de petit diamètre, elles sont peu propres à déterminer ce coefficient pour les grands cours d'eau, pour lesquels la

valeur $\varepsilon = \frac{1}{3\,200}$ paraît beaucoup trop faible. Ce n'est que dans les grandes sections, et par conséquent dans les canaux découverts et dans les fortes pentes, qu'il importe d'introduire dans les formules les considérations qui précèdent; elles sont sans importance dans les cas contraires. Ce n'est aussi que par des observations faites sur ces sections qu'on parviendra à déterminer la valeur de $\varepsilon$.

### TUYAUX DE CONDUITE DES EAUX.

**165.** Outre la formule relative à l'établissement des canaux à ciel découvert (160), de Prony, de la discussion de 51 expériences de Dubuat, Bossut et Couplet, a encore conclu une formule analogue pour le cas d'une conduite cylindrique régulière dans laquelle le régime des eaux est établi; cette formule est

$$\frac{DJ}{4} = av + bv^2 = 0.000\,017\,3v + 0.000\,348v^2,$$

de laquelle on tire (*Int.*, 488)

$$v = \sqrt{0.006\,2 + 2871{,}44\,\frac{DJ}{4}} - 0.025,$$

ou à peu près

$$v = 53.58\sqrt{\frac{DJ}{4}} - 0.025.$$

$v$ vitesse moyenne de régime;
D diamètre intérieur de la conduite;
J pente par mètre, ou différence de niveau de l'eau aux deux extrémités de la conduite divisée par la longueur totale de la conduite;
$a$ coefficient égal à 0,000 017 331 4 d'après de Prony, et à 0,000 022 36 d'après Eytelwein;
$b$ coefficient égal à 0,000 348 259 0 d'après de Prony, et à 0,000 280 32 d'après Eytelwein.

Ayant $v$, on a la dépense

$$Q = Sv = \frac{\pi D^2}{4}\,v. \qquad (Int., 668)$$

M. de Saint-Venant, de la discussion des résultats qui ont servi à de Prony et Eytelwein pour établir leur formule, a conclu la formule monome (mémoire cité page 114)

$$\frac{DJ}{4} = 0{,}000\,295\,57v^{\frac{12}{7}}, \text{ d'où } v = 114{,}494\left(\frac{DJ}{4}\right)^{\frac{7}{12}}.$$

$v$ et D ont les mêmes significations que ci-dessus. Quant à J, il en a une un peu différente, qui avait été admise par Dubuat et ensuite par Eytelwein.

La *hauteur de charge*, dit Dubuat (*Principes d'hydraulique*), est une force motrice qui peut être considérée comme divisée en deux parties, l'une *employée à imprimer la vitesse*, l'autre à vaincre la résistance qui naît du mouvement dans toute la longueur du tuyau.

La première de ces deux parties de la charge serait $\frac{v^2}{2g}$ s'il n'y avait pas de contraction à la jonction du tuyau avec le réservoir ; mais comme dans les expériences l'entrée du tuyau n'était pas évasée, Dubuat prend $\frac{v^2}{\mu^2 \times 2g}$ pour la portion surmontant la *résistance d'inertie* du fluide, portion dont la partie $\left(\frac{1}{\mu^2} - 1\right)\frac{v^2}{2g}$ est consommée à engendrer les tourbillonnements, suite inévitable de l'épanouissement rapide de la veine après sa contraction. C'est le surplus

$$Z - \frac{v^2}{2\mu^2 g},$$

qui, divisé par la longueur L du tuyau, donne à Dubuat la *pente fictive* J, qui, multipliée par le poids du fluide de l'unité de longueur du tuyau, donne la force faisant équilibre à la résistance des parois dans la même étendue

Z pente totale ou différence de niveau de l'eau aux deux extrémités de la conduite ;

$\frac{1}{\mu^2} = 1{,}55$, ou environ $\mu = 0{,}80$, d'après des expériences de Bossut, où le tuyau était soudé à un réservoir en fer-blanc dont l'orifice devait être à vive arête ;

$\frac{1}{\mu^2} = 1{,}35$, ou environ $\mu = 0{,}86$, d'après les expériences de Dubuat, où le tuyau partait d'une caisse en bois dont l'orifice avait apparemment des arêtes un peu arrondies ou formait comme un léger évasement à l'entrée de l'eau.

C'est en adoptant la valeur de J de Dubuat que M. de Saint-Venant est parvenu, comme pour les canaux (160), à représenter le mouvement de l'eau dans les tuyaux à l'aide de la formule

$$\frac{\pi D^2}{4} \frac{Z - \frac{v^2}{2\mu^2 g}}{L} = \pi D \times c v^m$$

ou

$$\frac{DJ}{4} = c v^m = 0{,}000\,295\,57\, v^{\frac{12}{7}}.$$

C'est afin d'abréger les calculs relatifs à la conduite des eaux, soit à

ciel découvert, soit au moyen de tuyaux, que de Prony a calculé le tableau suivant, qui satisfait aux cas ordinaires de la pratique. Ce tableau contient en outre les valeurs de RI données par la formule d'Eytelwein (160). C'est dans le même but que M. de Saint-Venant a calculé les valeurs de RI et celle de $\frac{DJ}{4}$ que nous reproduisons au tableau de la page 131.

Des expériences faites par M. Darcy sur les conduites d'eau de Dijon (159), il résulte que pour une conduite entièrement ouverte à son extrémité, on a

$$Q = \sqrt{\frac{\pi^2 R^5 H}{bl}},$$

et que pour une conduite portant seulement à son extrémité une ouverture de rayon $r$, on a

$$Q' = \sqrt{\frac{\pi^2 R^5 H}{bl + \frac{R^5}{2gm^2r^4}}}.$$

Q dépense de la conduite ouverte ;
Q′ dépense de la conduite terminée par une ouverture de rayon $r$ ;
R rayon de la conduite ;
$l$ longueur de la conduite ;
H charge totale ou différence de niveau des deux extrémités de la conduite ;
$m$ coefficient de la dépense, qui a été trouvé égal à 0,736 pour $r = 0^m,025$ ;
$b$ coefficient de résistance de l'eau dans la conduite, et dont les valeurs, données par des expériences sur différentes conduites, sont consignées dans le tableau suivant :

| | mèt. | mèt. | mèt. | mèt. | mèt. |
|---|---|---|---|---|---|
| $l$ = | 1523,50 | 1494,25 | 2143,10 | 2692,30 | 1523,50 |
| R = | 0,113 9 | 0,081 69 | 0,063 704 | 0,078 40 | 0,124 245 |
| $b$ = | 0,000 565 | 0,000 586 | 0,000 614 | 0,000 587 | 0,000 558 |
| $b'$ = | 0,000 785 76 | 0,000 826 82 | 0,001 121 07 | 0,001 005 49 | 0,000 957 385 |

Les valeurs $b$ ont été fournies par les conduites neuves, et celles $b'$ par les mêmes conduites 7 ans plus tard. Ce tableau montre qu'il convient, dans les applications, de doubler les coefficients de la résistance due aux tuyaux neufs.

| VITESSES moyennes $v$. | VALEURS CORRESPONDANTES de RI dans les canaux. | | de $\frac{1}{4}$ DJ dans les tuyaux. | VITESSES moyennes $v$. | VALEURS CORRESPONDANTES de RI dans les canaux. | | de $\frac{1}{4}$ DJ dans les tuyaux. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | EYTELWEIN. | DE PRONY. | DE PRONY. | | EYTELWEIN. | DE PRONY. | DE PRONY. |
| m. | | | | m | | | |
| 0.01 | 0.000 000 3 | 0.000 000 5 | 0.000 000 2 | 0.51 | 0.000 107 5 | 0.000 103 1 | 0.000 099 4 |
| 0.02 | 0.000 000 6 | 0.000 001 0 | 0.000 000 5 | 0.52 | 0.000 111 5 | 0.000 106 8 | 0.000 103 2 |
| 0.03 | 0.000 001 1 | 0.000 001 6 | 0.000 000 8 | 0.53 | 0.000 115 5 | 0.000 110 4 | 0.000 107 0 |
| 0.04 | 0.000 001 6 | 0.000 002 3 | 0.000 001 3 | 0.54 | 0.000 119 7 | 0.000 114 2 | 0.000 110 9 |
| 0.05 | 0.000 002 1 | 0.000 003 0 | 0.000 001 7 | 0.55 | 0.000 123 9 | 0.000 118 0 | 0.000 114 9 |
| 0.06 | 0.000 002 8 | 0.000 003 8 | 0.000 002 3 | 0.56 | 0.000 128 2 | 0.000 121 9 | 0.000 118 9 |
| 0.07 | 0.000 003 5 | 0.000 004 6 | 0.000 002 9 | 0.57 | 0.000 132 6 | 0.000 125 8 | 0.000 123 0 |
| 0.08 | 0.000 004 3 | 0.000 005 5 | 0.000 003 6 | 0.58 | 0.000 137 0 | 0.000 129 8 | 0.000 127 2 |
| 0.09 | 0.000 005 1 | 0.000 006 5 | 0.000 004 4 | 0.59 | 0.000 141 6 | 0.000 133 9 | 0.000 131 5 |
| 0.10 | 0.000 006 0 | 0.000 007 5 | 0.000 005 2 | 0.60 | 0.000 146 1 | 0.000 138 0 | 0.000 135 8 |
| 0.11 | 0.000 007 1 | 0.000 008 6 | 0.000 006 1 | 0.61 | 0.000 150 8 | 0.000 142 2 | 0.000 140 2 |
| 0.12 | 0.000 008 2 | 0.000 009 8 | 0.000 007 1 | 0.62 | 0.000 155 6 | 0.000 146 5 | 0.000 144 6 |
| 0.13 | 0.000 009 3 | 0.000 011 0 | 0.000 008 1 | 0.63 | 0.000 160 4 | 0.000 150 8 | 0.000 149 1 |
| 0.14 | 0.000 010 6 | 0.000 012 3 | 0.000 009 3 | 0.64 | 0.000 165 3 | 0.000 155 1 | 0.000 153 7 |
| 0.15 | 0.000 011 9 | 0.000 013 6 | 0.000 010 4 | 0.65 | 0.000 170 2 | 0.000 159 6 | 0.000 158 4 |
| 0.16 | 0.000 013 2 | 0.000 015 0 | 0.000 011 7 | 0.66 | 0.000 175 3 | 0.000 164 1 | 0.000 163 1 |
| 0.17 | 0.000 014 7 | 0.000 016 5 | 0.000 013 0 | 0.67 | 0.000 180 3 | 0.000 168 6 | 0.000 167 9 |
| 0.18 | 0.000 016 2 | 0.000 018 0 | 0.000 014 4 | 0.68 | 0.000 185 5 | 0.000 173 3 | 0.000 172 8 |
| 0.19 | 0.000 017 8 | 0.000 019 6 | 0.000 015 9 | 0.69 | 0.000 190 8 | 0.000 177 9 | 0.000 177 8 |
| 0.20 | 0.000 019 5 | 0.000 021 3 | 0.000 017 4 | 0.70 | 0.000 196 1 | 0.000 182 7 | 0.000 182 8 |
| 0.21 | 0.000 021 2 | 0.000 023 0 | 0.000 019 0 | 0.71 | 0.000 201 5 | 0.000 187 5 | 0.000 187 9 |
| 0.22 | 0.000 023 0 | 0.000 024 7 | 0.000 020 7 | 0.72 | 0.000 207 0 | 0.000 192 4 | 0.000 193 0 |
| 0.23 | 0.000 024 9 | 0.000 026 6 | 0.000 022 4 | 0.73 | 0.000 212 5 | 0.000 197 3 | 0.000 198 2 |
| 0.24 | 0.000 026 9 | 0.000 028 5 | 0.000 024 2 | 0.74 | 0.000 218 1 | 0.000 202 3 | 0.000 203 5 |
| 0.25 | 0.000 028 9 | 0.000 030 4 | 0.000 026 1 | 0.75 | 0.000 223 8 | 0.000 207 3 | 0.000 208 9 |
| 0.26 | 0.000 031 0 | 0.000 032 5 | 0.000 028 0 | 0.76 | 0.000 229 6 | 0.000 212 4 | 0.000 214 3 |
| 0.27 | 0.000 033 2 | 0.000 034 6 | 0.000 030 1 | 0.77 | 0.000 235 4 | 0.000 217 6 | 0.000 219 8 |
| 0.28 | 0.000 035 4 | 0.000 036 7 | 0.000 032 2 | 0.78 | 0.000 241 3 | 0.000 222 9 | 0.000 225 4 |
| 0.29 | 0.000 037 8 | 0.000 038 9 | 0.000 034 3 | 0.79 | 0.000 247 3 | 0.000 228 2 | 0.000 231 0 |
| 0.30 | 0.000 040 2 | 0.000 041 2 | 0.000 036 5 | 0.80 | 0.000 253 4 | 0.000 233 5 | 0.000 236 8 |
| 0.31 | 0.000 042 5 | 0.000 043 5 | 0.000 038 8 | 0.81 | 0.000 259 5 | 0.000 238 9 | 0.000 242 5 |
| 0.32 | 0.000 045 2 | 0.000 045 9 | 0.000 041 2 | 0.82 | 0.000 265 7 | 0.000 244 4 | 0.000 248 4 |
| 0.33 | 0.000 047 8 | 0.000 048 4 | 0.000 043 6 | 0.83 | 0.000 272 0 | 0.000 250 0 | 0.000 254 3 |
| 0.34 | 0.000 050 5 | 0.000 050 9 | 0.000 046 2 | 0.84 | 0.000 278 3 | 0.000 255 6 | 0.000 260 3 |
| 0.35 | 0.000 053 3 | 0.000 053 4 | 0.000 048 7 | 0.85 | 0.000 284 7 | 0.000 261 3 | 0.000 266 3 |
| 0.36 | 0.000 056 1 | 0.000 056 1 | 0.000 051 4 | 0.86 | 0.000 291 2 | 0.000 267 0 | 0.000 272 5 |
| 0.37 | 0.000 059 0 | 0.000 058 8 | 0.000 054 1 | 0.87 | 0.000 297 8 | 0.000 272 8 | 0.000 278 7 |
| 0.38 | 0.000 062 0 | 0.000 061 6 | 0.000 056 9 | 0.88 | 0.000 304 4 | 0.000 278 6 | 0.000 284 9 |
| 0.39 | 0.000 065 1 | 0.000 064 4 | 0.000 059 7 | 0.89 | 0.000 311 1 | 0.000 284 6 | 0.000 291 3 |
| 0.40 | 0.000 068 2 | 0.000 067 3 | 0.000 062 7 | 0.90 | 0.000 317 9 | 0.000 290 6 | 0.000 297 7 |
| 0.41 | 0.000 071 4 | 0.000 070 2 | 0.000 065 6 | 0.91 | 0.000 324 8 | 0.000 296 6 | 0.000 304 2 |
| 0.42 | 0.000 074 7 | 0.000 073 2 | 0.000 068 7 | 0.92 | 0.000 331 7 | 0.000 302 7 | 0.000 310 7 |
| 0.43 | 0.000 078 0 | 0.000 076 3 | 0.000 071 8 | 0.93 | 0.000 338 7 | 0.000 308 9 | 0.000 317 3 |
| 0.44 | 0.000 081 4 | 0.000 079 4 | 0.000 075 0 | 0.94 | 0.000 345 8 | 0.000 315 1 | 0.000 324 0 |
| 0.45 | 0.000 084 9 | 0.000 082 6 | 0.000 078 3 | 0.95 | 0.000 353 0 | 0.000 321 4 | 0.000 330 8 |
| 0.46 | 0.000 088 5 | 0.000 085 9 | 0.000 081 7 | 0.96 | 0.000 360 2 | 0.000 327 7 | 0.000 337 6 |
| 0.47 | 0.000 092 2 | 0.000 089 2 | 0.000 085 1 | 0.97 | 0.000 367 5 | 0.000 334 2 | 0.000 344 5 |
| 0.48 | 0.000 095 9 | 0.000 092 6 | 0.000 088 6 | 0.98 | 0.000 374 9 | 0.000 340 6 | 0.000 351 5 |
| 0.49 | 0.000 099 7 | 0.000 096 0 | 0.000 092 1 | 0.99 | 0.000 382 3 | 0.000 347 2 | 0.000 358 5 |
| 0.50 | 0.000 103 5 | 0.000 099 6 | 0.000 095 7 | 1.00 | 0.000 389 8 | 0.000 353 8 | 0.000 365 6 |

| VITESSES moyennes v. | VALEURS CORRESPONDANTES de RI dans les canaux. | | de $\frac{1}{4}$ DJ dans les tuyaux. | VITESSES moyennes v. | VALEURS CORRESPONDANTES de RI dans les canaux. | | de $\frac{1}{4}$ DJ dans les tuyaux. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | EYTELWEIN. | DE PRONY. | DE PRONY. | | EYTELWEIN. | DE PRONY. | DE PRONY. |
| m | | | | m | | | |
| 1.01 | 0.000 397 4 | 0.000 360 4 | 0.000 372 8 | 1.51 | 0.000 870 1 | 0.000 772 4 | 0.000 820 2 |
| 1.02 | 0.000 405 1 | 0.000 367 2 | 0.000 380 0 | 1.52 | 0.000 881 4 | 0.000 782 2 | 0.000 831 0 |
| 1.03 | 0.000 412 8 | 0.000 373 9 | 0.000 387 3 | 1.53 | 0.000 892 8 | 0.000 792 1 | 0.000 841 8 |
| 1.04 | 0.000 420 6 | 0.000 380 8 | 0.000 394 7 | 1.54 | 0.000 904 3 | 0.000 802 0 | 0.000 852 6 |
| 1.05 | 0.000 428 6 | 0.000 387 7 | 0.000 402 2 | 1.55 | 0.000 915 8 | 0.000 812 0 | 0.000 863 6 |
| 1.06 | 0.000 436 4 | 0.000 394 7 | 0.000 409 7 | 1.56 | 0.000 927 4 | 0.000 822 1 | 0.000 874 6 |
| 1.07 | 0.000 444 5 | 0.000 401 7 | 0.000 417 3 | 1.57 | 0.000 939 1 | 0.000 832 2 | 0.000 885 6 |
| 1.08 | 0.000 452 6 | 0.000 408 8 | 0.000 424 9 | 1.58 | 0.000 950 9 | 0.000 842 4 | 0.000 896 8 |
| 1.09 | 0.000 460 7 | 0.000 415 9 | 0.000 432 7 | 1.59 | 0.000 962 7 | 0.000 852 7 | 0.000 908 0 |
| 1.10 | 0.000 469 0 | 0.000 423 2 | 0.000 440 5 | 1.60 | 0.000 974 6 | 0.000 863 0 | 0.000 919 3 |
| 1.11 | 0.000 477 3 | 0.000 430 4 | 0.000 448 3 | 1.61 | 0.000 986 6 | 0.000 873 3 | 0.000 930 6 |
| 1.12 | 0.000 485 7 | 0.000 437 8 | 0.000 456 3 | 1.62 | 0.000 998 6 | 0.000 883 8 | 0.000 942 0 |
| 1.13 | 0.000 494 2 | 0.000 445 2 | 0.000 464 3 | 1.63 | 0.001 010 8 | 0.000 894 3 | 0.000 953 5 |
| 1.14 | 0.000 502 7 | 0.000 452 7 | 0.000 472 4 | 1.64 | 0.001 023 0 | 0.000 904 8 | 0.000 965 1 |
| 1.15 | 0.000 511 3 | 0.000 460 2 | 0.000 480 5 | 1.65 | 0.001 035 2 | 0.000 915 5 | 0.000 976 7 |
| 1.16 | 0.000 520 0 | 0.000 467 8 | 0.000 488 7 | 1.66 | 0.001 047 6 | 0.000 926 1 | 0.000 988 4 |
| 1.17 | 0.000 528 8 | 0.000 475 4 | 0.000 497 0 | 1.67 | 0.001 059 9 | 0.000 936 9 | 0.001 000 2 |
| 1.18 | 0.000 537 6 | 0.000 483 1 | 0.000 505 4 | 1.68 | 0.001 072 5 | 0.000 947 7 | 0.001 012 0 |
| 1.19 | 0.000 546 5 | 0.000 490 9 | 0.000 513 8 | 1.69 | 0.001 085 0 | 0.000 958 6 | 0.001 024 0 |
| 1.20 | 0.000 555 5 | 0.000 498 8 | 0.000 522 3 | 1.70 | 0.001 097 7 | 0.000 969 5 | 0.001 035 9 |
| 1.21 | 0.000 564 6 | 0.000 506 7 | 0.000 530 9 | 1.71 | 0.001 110 4 | 0.000 980 5 | 0.001 048 0 |
| 1.22 | 0.000 573 7 | 0.000 514 6 | 0.000 539 5 | 1.72 | 0.001 123 1 | 0.000 991 5 | 0.001 060 1 |
| 1.23 | 0.000 582 9 | 0.000 522 6 | 0.000 548 2 | 1.73 | 0.001 136 0 | 0.001 002 6 | 0.001 072 3 |
| 1.24 | 0.000 592 1 | 0.000 530 7 | 0.000 557 0 | 1.74 | 0.001 148 9 | 0.001 013 8 | 0.001 084 5 |
| 1.25 | 0.000 601 5 | 0.000 538 9 | 0.000 565 8 | 1.75 | 0.001 162 0 | 0.001 025 1 | 0.001 096 9 |
| 1.26 | 0.000 610 9 | 0.000 547 1 | 0.000 574 7 | 1.76 | 0.001 175 0 | 0.001 036 4 | 0.001 109 3 |
| 1.27 | 0.000 620 5 | 0.000 555 3 | 0.000 583 7 | 1.77 | 0.001 188 1 | 0.001 047 7 | 0.001 121 7 |
| 1.28 | 0.000 630 0 | 0.000 563 7 | 0.000 592 8 | 1.78 | 0.001 201 4 | 0.001 059 2 | 0.001 134 3 |
| 1.29 | 0.000 639 6 | 0.000 572 1 | 0.000 601 9 | 1.79 | 0.001 214 6 | 0.001 070 6 | 0.001 146 9 |
| 1.30 | 0.000 649 3 | 0.000 580 5 | 0.000 611 1 | 1.80 | 0.001 228 1 | 0.001 082 2 | 0.001 159 6 |
| 1.31 | 0.000 659 1 | 0.000 589 0 | 0.000 620 4 | 1.81 | 0.001 241 4 | 0.001 093 8 | 0.001 172 3 |
| 1.32 | 0.000 669 0 | 0.000 597 6 | 0.000 629 7 | 1.82 | 0.001 255 1 | 0.001 105 5 | 0.001 185 1 |
| 1.33 | 0.000 678 9 | 0.000 606 3 | 0.000 639 1 | 1.83 | 0.001 268 6 | 0.001 117 2 | 0.001 198 0 |
| 1.34 | 0.000 688 9 | 0.000 615 0 | 0.000 648 6 | 1.84 | 0.001 282 2 | 0.001 129 0 | 0.001 211 0 |
| 1.35 | 0.000 699 0 | 0.000 623 7 | 0.000 658 1 | 1.85 | 0.001 296 0 | 0.001 140 9 | 0.001 224 0 |
| 1.36 | 0.000 709 1 | 0.000 632 6 | 0.000 667 7 | 1.86 | 0.001 309 7 | 0.001 152 8 | 0.001 237 1 |
| 1.37 | 0.000 719 3 | 0.000 641 4 | 0.000 677 4 | 1.87 | 0.001 323 7 | 0.001 164 8 | 0.001 250 2 |
| 1.38 | 0.000 729 6 | 0.000 650 4 | 0.000 687 1 | 1.88 | 0.001 337 5 | 0.001 176 8 | 0.001 263 5 |
| 1.39 | 0.000 740 0 | 0.000 659 4 | 0.000 697 0 | 1 89 | 0.001 351 6 | 0.001 188 9 | 0.001 276 8 |
| 1.40 | 0.000 750 4 | 0.000 668 5 | 0.000 706 9 | 1.90 | 0.001 365 7 | 0.001 201 1 | 0.001 290 1 |
| 1.41 | 0.000 760 9 | 0.000 677 6 | 0.000 716 8 | 1.91 | 0.001 379 8 | 0.001 213 3 | 0.001 303 6 |
| 1.42 | 0.000 771 5 | 0.000 686 8 | 0.000 726 8 | 1.92 | 0.001 394 1 | 0.001 225 6 | 0.001 317 1 |
| 1.43 | 0.000 782 2 | 0.000 696 1 | 0.000 736 9 | 1.93 | 0.001 408 4 | 0.001 238 0 | 0.001 330 7 |
| 1.44 | 0.000 792 9 | 0.000 705 4 | 0.000 747 1 | 1.94 | 0.001 422 8 | 0.001 259 4 | 0 001 344 3 |
| 1.45 | 0.000 803 7 | 0.000 714 8 | 0.000 757 3 | 1.95 | 0.001 437 3 | 0.001 262 8 | 0.001 358 1 |
| 1.46 | 0.000 814 6 | 0.000 724 2 | 0.000 767 7 | 1.96 | 0.001 451 9 | 0.001 275 4 | 0.001 371 8 |
| 1.47 | 0.000 825 8 | 0.000 733 7 | 0 000 778 0 | 1.97 | 0.001 466 4 | 0.001 288 0 | 0.001 385 7 |
| 1.48 | 0.000 836 6 | 0.000 743 3 | 0.000 788 5 | 1.98 | 0.001 481 1 | 0 001 300 6 | 0.001 399 6 |
| 1.49 | 0.000 847 7 | 0.000 752 9 | 0.000 799 0 | 1.99 | 0.001 495 9 | 0.001 313 4 | 0.001 413 6 |
| 1.50 | 0.000 858 9 | 0.000 762 6 | 0.000 809 6 | 2.00 | 0.001 510 7 | 0.001 326 2 | 0.001 427 7 |

| VITESSES moyennes v. | VALEURS CORRESPONDANTES de RI dans les canaux. | | de $\frac{1}{4}$ DJ dans les tuyaux. | VITESSES moyennes v. | VALEURS CORRESPONDANTES de RI dans les canaux. | | de $\frac{1}{4}$ DJ dans les tuyaux. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | EYTELWEIN. | DE PRONY. | DE PRONY. | | EYTELWEIN. | DE PRONY. | DE PRONY. |
| m | | | | m | | | |
| 2.01 | 0.001 525 7 | 0.001 339 0 | 0.001 441 8 | 2.51 | 0.002 363 8 | 0.002 060 3 | 0.002 237 6 |
| 2.02 | 0.001 540 5 | 0.001 351 9 | 0.001 456 0 | 2.52 | 0.002 382 4 | 0.002 076 3 | 0.002 255 3 |
| 2.03 | 0.001 555 6 | 0.001 364 9 | 0.001 470 3 | 2.53 | 0.002 401 2 | 0.002 092 4 | 0.002 273 0 |
| 2.04 | 0.001 570 7 | 0.001 377 9 | 0.001 484 7 | 2.54 | 0.002 419 9 | 0.002 108 5 | 0.002 290 8 |
| 2.05 | 0.001 585 9 | 0.001 391 0 | 0.001 499 1 | 2.55 | 0.002 438 8 | 0.002 124 7 | 0.002 308 7 |
| 2.06 | 0.001 601 2 | 0 001 404 2 | 0.001 513 6 | 2.56 | 0.002 457 7 | 0.002 140 9 | 0.002 326 7 |
| 2.07 | 0.001 616 5 | 0.001 417 4 | 0.001 528 1 | 2.57 | 0.002 476 8 | 0.002 157 2 | 0.002 344 8 |
| 2.08 | 0.001 632 0 | 0.001 430 7 | 0.001 542 8 | 2.58 | 0.002 495 8 | 0.002 173 6 | 0.002 362 9 |
| 2.09 | 0.001 647 4 | 0.001 444 0 | 0.001 557 5 | 2.59 | 0.002 514 9 | 0.002 190 0 | 0.002 381 0 |
| 2.10 | 0.001 663 0 | 0.001 457 4 | 0.001 572 2 | 2.60 | 0.002 534 0 | 0.002 206 5 | 0.002 399 3 |
| 2.11 | 0.001 678 6 | 0.001 470 9 | 0.001 587 1 | 2.61 | 0.002 553 4 | 0.002 223 1 | 0.002 417 6 |
| 2.12 | 0.001 694 3 | 0.001 484 4 | 0.001 602 0 | 2.62 | 0.002 572 8 | 0.002 239 7 | 0.002 436 0 |
| 2.13 | 0.001 710 1 | 0.001 498 0 | 0.001 616 9 | 2.63 | 0.002 592 2 | 0.002 256 4 | 0.002 454 5 |
| 2.14 | 0.001 725 7 | 0.001 511 7 | 0.001 632 0 | 2.64 | 0.002 611 8 | 0.002 273 1 | 0.002 473 0 |
| 2.15 | 0.001 741 9 | 0.001 525 4 | 0.001 647 1 | 2.65 | 0.002 631 3 | 0.002 290 0 | 0 002 491 6 |
| 2.16 | 0.001 757 9 | 0.001 539 2 | 0.001 662 3 | 2.66 | 0.002 650 9 | 0.002 306 8 | 0.002 510 2 |
| 2.17 | 0.001 774 0 | 0.001 553 0 | 0.001 677 5 | 2.67 | 0.002 670 7 | 0.002 323 8 | 0.002 529 0 |
| 2.18 | 0.001 790 1 | 0.001 566 9 | 0.001 692 8 | 2.68 | 0.002 690 5 | 0.002 340 7 | 0.002 547 8 |
| 2.19 | 0.001 806 3 | 0.001 580 9 | 0.001 708 2 | 2.69 | 0.002 710 4 | 0.002 357 8 | 0.002 566 7 |
| 2.20 | 0.001 822 6 | 0.001 594 9 | 0.001 723 7 | 2.70 | 0.002 730 3 | 0.002 374 9 | 0.002 585 6 |
| 2.21 | 0.001 838 9 | 0.001 609 0 | 0.001 739 2 | 2.71 | 0.002 750 4 | 0.002 392 1 | 0.002 604 6 |
| 2.22 | 0.001 855 4 | 0.001 623 1 | 0.001 754 8 | 2.72 | 0.002 770 4 | 0.002 409 3 | 0.002 623 7 |
| 2.23 | 0.001 871 9 | 0.001 637 3 | 0.001 770 5 | 2.73 | 0.002 790 6 | 0.002 426 6 | 0.002 642 9 |
| 2.24 | 0.001 888 5 | 0.001 651 6 | 0.001 786 2 | 2.74 | 0.002 810 8 | 0.002 444 0 | 0.002 662 1 |
| 2.25 | 0.001 905 2 | 0.001 665 9 | 0.001 802 1 | 2.75 | 0.002 831 1 | 0.002 461 4 | 0.002 681 4 |
| 2.26 | 0.001 921 8 | 0.001 680 3 | 0.001 817 9 | 2.76 | 0.002 851 5 | 0.002 478 9 | 0.002 700 7 |
| 2.27 | 0.001 938 7 | 0.001 694 8 | 0.001 833 9 | 2.77 | 0.002 872 0 | 0.002 496 5 | 0.002 720 2 |
| 2.28 | 0.001 955 5 | 0.001 709 3 | 0.001 849 9 | 2.78 | 0.002 892 5 | 0.002 514 1 | 0.002 739 7 |
| 2.29 | 0.001 972 5 | 0.001 723 9 | 0.001 866 0 | 2.79 | 0.002 913 1 | 0 002 531 8 | 0.002 759 2 |
| 2.30 | 0.001 989 5 | 0.001 738 5 | 0.001 882 2 | 2.80 | 0.002 933 8 | 0.002 549 5 | 0.002 778 9 |
| 2.31 | 0.002 006 7 | 0.001 753 2 | 0.001 898 4 | 2.81 | 0.002 954 5 | 0.002 567 3 | 0.002 798 6 |
| 2.32 | 0.002 023 8 | 0.001 768 0 | 0.001 914 7 | 2.82 | 0.002 975 4 | 0.002 585 1 | 0.002 818 4 |
| 2.33 | 0.002 041 0 | 0.001 782 8 | 0.001 931 0 | 2.83 | 0.002 996 3 | 0.002 603 1 | 0.002 838 2 |
| 2.34 | 0.002 058 4 | 0.001 797 7 | 0.001 947 5 | 2.84 | 0.003 017 2 | 0.002 621 0 | 0.002 858 1 |
| 2.35 | 0.002 075 7 | 0.001 812 6 | 0.001 964 0 | 2.85 | 0.003 038 3 | 0.002 639 1 | 0.002 878 1 |
| 2.36 | 0.002 093 2 | 0.001 827 7 | 0.001 980 6 | 2.86 | 0.003 059 4 | 0.002 657 2 | 0.002 898 2 |
| 2.37 | 0.002 110 7 | 0.001 842 7 | 0.001 997 2 | 2.87 | 0.003 080 6 | 0.002 675 4 | 0.002 918 3 |
| 2.38 | 0.002 128 4 | 0.001 857 9 | 0.002 013 9 | 2.88 | 0.003 101 8 | 0.002 693 6 | 0.002 938 5 |
| 2.39 | 0.002 146 0 | 0.001 873 1 | 0.002 030 7 | 2.89 | 0.003 123 2 | 0.002 711 9 | 0.002 958 8 |
| 2.40 | 0.002 163 7 | 0.001 888 3 | 0.002 047 6 | 2.90 | 0.003 144 6 | 0.002 730 2 | 0.002 979 1 |
| 2.41 | 0.002 181 6 | 0.001 903 7 | 0.002 064 5 | 2.91 | 0.003 166 1 | 0.002 748 7 | 0.002 999 5 |
| 2.42 | 0.002 199 5 | 0.001 919 0 | 0.002 081 5 | 2.92 | 0.003 187 6 | 0.002 767 1 | 0.003 020 0 |
| 2.43 | 0.002 217 5 | 0.001 934 5 | 0.002 098 5 | 2.93 | 0.003 209 2 | 0.002 785 7 | 0.003 040 5 |
| 2.44 | 0.002 235 5 | 0.001 950 0 | 0.002 115 7 | 2.94 | 0.003 230 9 | 0.002 804 3 | 0.003 061 2 |
| 2.45 | 0.002 253 6 | 0.001 965 6 | 0.002 132 9 | 2.95 | 0.003 252 7 | 0.002 822 9 | 0.003 081 9 |
| 2.46 | 0.002 271 8 | 0.001 981 2 | 0.002 150 2 | 2.96 | 0.003 274 5 | 0.002 841 7 | 0.003 102 6 |
| 2.47 | 0.002 290 0 | 0.001 986 9 | 0.002 167 5 | 2.97 | 0.003 296 5 | 0.002 860 5 | 0.003 123 4 |
| 2.48 | 0.002 308 4 | 0.002 012 6 | 0.002 184 9 | 2.98 | 0.003 318 5 | 0.002 879 3 | 0.003 144 3 |
| 2.49 | 0.002 326 8 | 0.002 028 5 | 0.002 202 4 | 2.99 | 0.003 340 5 | 0.002 898 2 | 0.003 165 3 |
| 2.50 | 0.002 345 3 | 0.002 044 3 | 0.002 219 9 | 3.00 | 0.003 362 7 | 0.002 917 2 | 0.003 186 3 |

*TABLE des valeurs de* $RI = 0.000\,401\,02\,v^{\frac{21}{11}}$ *dans les canaux, et de* $\frac{DJ}{4} = 0.000\,295\,57\,v^{\frac{12}{7}}$ *dans les tuyaux, d'après M. de Saint-Venant.*

| VITESSE moyenne $v$. | VALEURS CORRESPONDANTES de RI. | VALEURS CORRESPONDANTES de $\frac{DJ}{4}$. | VITESSE moyenne $v$. | VALEURS CORRESPONDANTES de RI. | VALEURS CORRESPONDANTES de $\frac{DJ}{4}$. |
|---|---|---|---|---|---|
| m. | | | m. | | |
| 0.04 | » | 0.000 001 19 | 0.51 | 0.000 110 89 | 0.000 093 19 |
| 0.05 | » | 0.000 001 74 | 0.52 | 0.000 115 08 | 0.000 096 34 |
| 0.06 | » | 0.000 002 38 | 0.53 | 0.000 119 34 | 0.000 099 54 |
| 0.07 | » | 0.000 003 10 | 0.54 | 0.000 123 67 | 0.000 102 78 |
| 0.08 | » | 0.000 003 89 | 0.55 | 0.000 128 08 | 0.000 106 06 |
| 0.09 | » | 0.000 004 76 | 0.56 | 0.000 132 57 | 0.000 109 39 |
| 0.10 | 0.000 004 94 | 0.000 005 71 | 0.57 | 0.000 137 13 | 0.000 112 76 |
| 0.11 | 0.000 005 93 | 0.000 006 72 | 0.58 | 0.000 141 76 | 0.000 116 17 |
| 0.12 | 0.000 007 00 | 0.000 007 80 | 0.59 | 0.000 146 46 | 0.000 119 63 |
| 0.13 | 0.000 008 16 | 0.000 008 95 | 0.60 | 0.000 151 23 | 0.000 123 13 |
| 0.14 | 0.000 009 40 | 0.000 010 16 | 0.61 | 0.000 156 08 | 0.000 126 67 |
| 0.15 | 0.000 010 72 | 0.000 011 43 | 0.62 | 0.000 161 00 | 0.000 130 25 |
| 0.16 | 0.000 012 13 | 0.000 012 77 | 0.63 | 0.000 165 99 | 0.000 133 87 |
| 0.17 | 0.000 013 62 | 0.000 014 17 | 0.64 | 0.000 171 06 | 0.000 137 53 |
| 0.18 | 0.000 015 19 | 0.000 015 63 | 0.65 | 0.000 176 20 | 0.000 141 23 |
| 0.19 | 0.000 016 84 | 0.000 017 15 | 0.66 | 0.000 181 41 | 0.000 144 97 |
| 0.20 | 0.000 018 57 | 0.000 018 72 | 0.67 | 0.000 186 69 | 0.000 148 76 |
| 0.21 | 0.000 020 38 | 0.000 020 36 | 0.68 | 0.000 192 05 | 0.000 152 59 |
| 0.22 | 0.000 022 27 | 0.000 022 05 | 0.69 | 0.000 197 48 | 0.000 156 46 |
| 0.23 | 0.000 024 25 | 0.000 023 80 | 0.70 | 0.000 202 98 | 0.000 160 37 |
| 0.24 | 0.000 026 30 | 0.000 025 60 | 0.71 | 0.000 208 55 | 0.000 164 31 |
| 0.25 | 0.000 028 43 | 0.000 027 45 | 0.72 | 0.000 214 19 | 0.000 168 30 |
| 0.26 | 0.000 030 64 | 0.000 029 36 | 0.73 | 0.000 219 90 | 0.000 172 33 |
| 0.27 | 0.000 032 93 | 0.000 031 32 | 0.74 | 0.000 225 69 | 0.000 176 40 |
| 0.28 | 0.000 035 30 | 0.000 033 33 | 0.75 | 0.000 231 55 | 0.000 180 50 |
| 0.29 | 0.000 037 74 | 0.000 035 40 | 0.76 | 0.000 237 48 | 0.000 184 65 |
| 0.30 | 0.000 040 27 | 0.000 037 52 | 0.77 | 0.000 243 48 | 0.000 188 83 |
| 0.31 | 0.000 042 87 | 0.000 039 69 | 0.78 | 0.000 249 55 | 0.000 193 06 |
| 0.32 | 0.000 045 55 | 0.000 041 91 | 0.79 | 0.000 255 70 | 0.000 197 32 |
| 0.33 | 0.000 048 30 | 0.000 044 18 | 0.80 | 0.000 261 92 | 0.000 201 62 |
| 0.34 | 0.000 051 14 | 0.000 046 50 | 0.81 | 0.000 268 21 | 0.000 205 96 |
| 0.35 | 0.000 054 05 | 0.000 048 87 | 0.82 | 0.000 274 56 | 0.000 210 34 |
| 0.36 | 0.000 057 03 | 0.000 051 29 | 0.83 | 0.000 280 98 | 0.000 214 75 |
| 0.37 | 0.000 060 09 | 0.000 053 76 | 0.84 | 0.000 287 48 | 0.000 219 21 |
| 0.38 | 0.000 063 23 | 0.000 056 27 | 0.85 | 0.000 294 05 | 0.000 223 70 |
| 0.39 | 0.000 066 45 | 0.000 058 83 | 0.86 | 0.000 300 69 | 0.000 228 23 |
| 0.40 | 0.000 069 74 | 0.000 061 44 | 0.87 | 0.000 307 40 | 0.000 232 80 |
| 0.41 | 0.000 073 10 | 0.000 064 10 | 0.88 | 0.000 314 18 | 0.000 237 41 |
| 0.42 | 0.000 076 55 | 0.000 066 81 | 0.89 | 0.000 321 03 | 0.000 242 05 |
| 0.43 | 0.000 080 07 | 0.000 069 56 | 0.90 | 0.000 327 95 | 0.000 246 73 |
| 0.44 | 0.000 083 65 | 0.000 072 35 | 0.91 | 0.000 334 94 | 0.000 251 45 |
| 0.45 | 0.000 087 32 | 0.000 075 19 | 0.92 | 0.000 342 01 | 0.000 256 20 |
| 0.46 | 0.000 091 06 | 0.000 078 08 | 0.93 | 0.000 349 13 | 0.000 260 99 |
| 0.47 | 0.000 094 88 | 0.000 081 01 | 0.94 | 0.000 356 34 | 0.000 265 82 |
| 0.48 | 0.000 098 77 | 0.000 083 99 | 0.95 | 0.000 363 61 | 0.000 270 69 |
| 0.49 | 0.000 102 74 | 0.000 087 01 | 0.96 | 0.000 370 95 | 0.000 275 59 |
| 0.50 | 0.000 106 78 | 0.000 090 08 | 0.97 | 0.000 378 36 | 0.000 280 53 |

| VITESSE moyenne v. | VALEURS CORRESPONDANTES de RI. | VALEURS CORRESPONDANTES de $\frac{DJ}{4}$. | VITESSE moyenne v. | VALEURS CORRESPONDANTES de RI. | VALEURS CORRESPONDANTES de $\frac{DJ}{4}$. |
|---|---|---|---|---|---|
| m. | | | m. | | |
| 0.98 | 0.000 385 85 | 0.000 285 51 | 1.51 | 0.000 880 8 | 0.000 599 1 |
| 0.99 | 0.000 393 41 | 0.000 290 52 | 1.52 | 0.000 891 9 | 0.000 605 9 |
| 1.00 | 0.000 401 03 | 0.000 295 57 | 1.53 | 0.000 903 1 | 0.000 612 7 |
| 1.01 | 0.000 408 7 | 0.000 300 7 | 1.54 | 0.000 914 4 | 0.000 619 6 |
| 1.02 | 0.000 416 5 | 0.000 305 8 | 1.55 | 0.000 925 8 | 0.000 626 5 |
| 1.03 | 0.000 424 3 | 0.000 310 9 | 1.56 | 0.000 937 2 | 0.000 633 5 |
| 1.04 | 0.000 432 2 | 0.000 316 1 | 1.57 | 0.000 948 8 | 0.000 640 5 |
| 1.05 | 0.000 440 2 | 0.000 321 3 | 1.58 | 0.000 960 4 | 0.000 647 5 |
| 1.06 | 0.000 448 2 | 0.000 326 6 | 1.59 | 0.000 972 0 | 0.000 654 5 |
| 1.07 | 0.000 456 3 | 0.000 331 9 | 1.60 | 0.000 983 7 | 0.000 661 6 |
| 1.08 | 0.000 464 5 | 0.000 337 3 | 1.61 | 0.000 995 5 | 0.000 668 7 |
| 1.09 | 0.000 472 7 | 0.000 342 6 | 1.62 | 0.001 007 3 | 0.000 675 8 |
| 1.10 | 0.000 481 0 | 0.000 348 0 | 1.63 | 0.001 019 2 | 0.000 683 0 |
| 1.11 | 0.000 489 4 | 0.000 353 5 | 1.64 | 0.001 031 2 | 0.000 690 2 |
| 1.12 | 0.000 497 9 | 0.000 359 0 | 1.65 | 0.001 043 2 | 0.000 697 4 |
| 1.13 | 0.000 506 4 | 0.000 364 5 | 1.66 | 0.001 055 3 | 0.000 704 7 |
| 1.14 | 0.000 515 0 | 0.000 370 0 | 1.67 | 0.001 067 5 | 0.000 712 0 |
| 1.15 | 0.000 523 7 | 0.000 375 6 | 1.68 | 0.001 079 7 | 0.000 719 3 |
| 1.16 | 0.000 532 4 | 0.000 381 2 | 1.69 | 0.001 092 0 | 0.000 726 6 |
| 1.17 | 0.000 541 2 | 0.000 386 9 | 1.70 | 0.001 104 4 | 0.000 734 0 |
| 1.18 | 0.000 550 0 | 0.000 392 6 | 1.71 | 0.001 116 9 | 0.000 741 4 |
| 1.19 | 0.000 559 0 | 0.000 398 3 | 1.72 | 0.001 129 3 | 0.000 748 9 |
| 1.20 | 0.000 568 0 | 0.000 404 0 | 1.73 | 0.001 141 9 | 0.000 756 4 |
| 1.21 | 0.000 577 1 | 0.000 409 8 | 1.74 | 0.001 154 5 | 0.000 763 9 |
| 1.22 | 0.000 586 2 | 0.000 415 6 | 1.75 | 0.001 167 2 | 0.000 771 4 |
| 1.23 | 0.000 595 4 | 0.000 421 5 | 1.76 | 0.001 180 0 | 0.000 779 0 |
| 1.24 | 0.000 604 7 | 0.000 427 4 | 1.77 | 0.001 202 8 | 0.000 786 6 |
| 1.25 | 0.000 614 0 | 0.000 433 3 | 1.78 | 0.001 205 7 | 0.000 794 2 |
| 1.26 | 0.000 623 4 | 0.000 439 3 | 1.79 | 0.001 218 7 | 0.000 801 9 |
| 1.27 | 0.000 632 9 | 0.000 445 2 | 1.80 | 0.001 231 7 | 0.000 809 6 |
| 1.28 | 0.000 642 5 | 0.000 451 3 | 1.81 | 0.001 244 8 | 0.000 817 3 |
| 1.29 | 0.000 652 1 | 0.000 457 4 | 1.82 | 0.001 258 0 | 0.000 825 1 |
| 1.30 | 0.000 661 8 | 0.000 463 4 | 1.83 | 0.001 271 2 | 0.000 832 9 |
| 1.31 | 0.000 671 5 | 0.000 469 6 | 1.84 | 0.001 284 5 | 0.000 840 7 |
| 1.32 | 0.000 681 3 | 0.000 475 7 | 1.85 | 0.001 297 8 | 0.000 848 5 |
| 1.33 | 0.000 691 2 | 0.000 481 9 | 1.86 | 0.001 311 3 | 0.000 856 4 |
| 1.34 | 0.000 701 1 | 0.000 488 2 | 1.87 | 0.001 324 8 | 0.000 864 3 |
| 1.35 | 0.000 711 2 | 0.000 494 4 | 1.88 | 0.001 338 4 | 0.000 872 2 |
| 1.36 | 0.000 721 3 | 0.000 500 7 | 1.89 | 0.001 352 0 | 0.000 880 2 |
| 1.37 | 0.000 731 5 | 0.000 507 0 | 1.90 | 0.001 365 6 | 0.000 888 2 |
| 1.38 | 0.000 741 7 | 0.000 513 4 | 1.91 | 0.001 379 4 | 0.000 896 3 |
| 1.39 | 0.000 752 0 | 0.000 519 8 | 1.92 | 0.001 393 2 | 0.000 904 3 |
| 1.40 | 0.000 762 3 | 0.000 526 2 | 1.93 | 0.001 407 1 | 0.000 912 4 |
| 1.41 | 0.000 772 7 | 0.000 532 7 | 1.94 | 0.001 421 0 | 0.000 920 5 |
| 1.42 | 0.000 783 2 | 0.000 539 2 | 1.95 | 0.001 435 0 | 0.000 928 7 |
| 1.43 | 0.000 793 8 | 0.000 545 7 | 1.96 | 0.001 449 1 | 0.000 936 9 |
| 1.44 | 0.000 804 4 | 0.000 552 3 | 1.97 | 0.001 463 3 | 0.000 945 1 |
| 1.45 | 0.000 815 1 | 0.000 558 9 | 1.98 | 0.001 477 5 | 0.000 953 3 |
| 1.46 | 0.000 825 9 | 0.000 565 5 | 1.99 | 0.001 491 8 | 0.000 961 6 |
| 1.47 | 0.000 836 7 | 0.000 572 1 | 2.00 | 0.001 506 2 | 0.000 969 9 |
| 1.48 | 0.000 847 6 | 0.000 578 8 | 2.01 | 0.001 520 6 | 0.000 978 2 |
| 1.49 | 0.000 858 6 | 0.000 585 5 | 2.02 | 0.001 535 1 | 0.000 986 6 |
| 1.50 | 0.000 869 7 | 0.000 592 3 | 2.03 | 0.001 549 6 | 0.000 994 9 |

| VITESSE moyenne v. | VALEURS CORRESPONDANTES de RI. | VALEURS CORRESPONDANTES de $\frac{DJ}{4}$. | VITESSE moyenne v. | VALEURS CORRESPONDANTES de RI. | VALEURS CORRESPONDANTES de $\frac{DJ}{4}$. |
|---|---|---|---|---|---|
| m. | | | m. | | |
| 2.04 | 0.001 564 2 | 0.001 003 4 | 2.53 | 0.002 359 2 | 0.001 451 2 |
| 2.05 | 0.001 578 8 | 0.001 011 8 | 2.54 | 0.002 377 0 | 0.001 464 0 |
| 2.06 | 0.001 593 5 | 0.001 020 3 | 2.55 | 0.002 394 9 | 0.001 470 9 |
| 2.07 | 0.001 608 3 | 0.001 028 8 | 2.56 | 0.002 412 9 | 0.001 480 8 |
| 2.08 | 0.001 623 2 | 0.001 037 3 | 2.57 | 0.002 430 9 | 0.001 490 7 |
| 2.09 | 0.001 638 2 | 0.001 045 9 | 2.58 | 0.002 449 0 | 0.001 500 7 |
| 2.10 | 0.001 653 2 | 0.001 054 5 | 2.59 | 0.002 467 1 | 0.001 510 7 |
| 2.11 | 0.001 668 3 | 0.001 063 1 | 2.60 | 0.002 485 3 | 0.001 520 7 |
| 2.12 | 0.001 683 4 | 0.001 071 7 | 2.61 | 0.002 503 6 | 0,001 530 7 |
| 2.13 | 0.001 698 6 | 0.001 080 4 | 2.62 | 0.002 522 0 | 0.001 540 8 |
| 2.14 | 0.001 713 8 | 0.001 089 1 | 2.63 | 0.002 540 4 | 0.001 550 9 |
| 2.15 | 0.001 729 1 | 0.001 097 9 | 2.64 | 0.002 558 9 | 0.001 561 0 |
| 2.16 | 0.001 744 5 | 0.001 106 6 | 2.65 | 0.002 577 4 | 0.001 571 2 |
| 2.17 | 0.001 759 9 | 0.001 115 4 | 2.66 | 0.002 596 0 | 0.001 581 3 |
| 2.18 | 0.001 775 4 | 0.001 124 3 | 2.67 | 0.002 614 7 | 0.001 591 5 |
| 2.19 | 0.001 791 0 | 0.001 133 1 | 2.68 | 0.002 633 4 | 0.001 601 8 |
| 2.20 | 0.001 806 7 | 0.001 142 0 | 2.69 | 0.002 652 2 | 0.001 612 1 |
| 2.21 | 0.001 822 4 | 0.001 150 9 | 2.70 | 0.002 671 0 | 0.001 622 4 |
| 2.22 | 0.001 838 2 | 0.001 159 9 | 2.71 | 0.002 689 9 | 0.001 632 7 |
| 2.23 | 0.001 854 0 | 0.001 168 9 | 2.72 | 0.002 708 9 | 0.001 643 0 |
| 2.24 | 0.001 869 9 | 0.001 177 8 | 2.73 | 0.002 728 0 | 0.001 653 4 |
| 2.25 | 0.001 885 9 | 0.001 186 9 | 2.74 | 0.002 747 1 | 0.001 663 8 |
| 2.26 | 0.001 902 0 | 0.001 195 9 | 2.75 | 0.002 766 3 | 0.001 674 2 |
| 2.27 | 0.001 918 1 | 0.001 205 0 | 2.76 | 0.002 785 5 | 0.001 684 6 |
| 2.28 | 0.001 934 2 | 0.001 214 1 | 2.77 | 0.002 804 8 | 0.001 695 1 |
| 2.29 | 0.001 950 4 | 0.001 223 3 | 2.78 | 0.002 824 2 | 0.001 705 6 |
| 2.30 | 0.001 966 7 | 0.001 232 5 | 2.79 | 0.002 843 6 | 0.001 716 2 |
| 2.31 | 0.001 983 1 | 0.001 241 7 | 2.80 | 0.002 863 1 | 0.001 726 7 |
| 2.32 | 0.001 999 5 | 0.001 250 9 | 2.81 | 0.002 882 7 | 0.001 737 3 |
| 2.33 | 0.002 016 0 | 0.001 260 1 | 2.82 | 0.002 902 3 | 0.001 747 9 |
| 2.34 | 0.002 032 6 | 0.001 269 4 | 2.83 | 0.002 922 0 | 0.001 758 5 |
| 2.35 | 0.002 049 2 | 0.001 278 7 | 2.84 | 0.002 941 7 | 0.001 769 2 |
| 2.36 | 0.002 065 8 | 0.001 288 1 | 2.85 | 0.002 961 5 | 0.001 779 9 |
| 2.37 | 0.002 082 5 | 0.001 297 4 | 2.86 | 0.002 981 4 | 0.001 790 6 |
| 2.38 | 0.002 099 3 | 0.001 306 8 | 2.87 | 0.003 001 3 | 0.001 801 4 |
| 2.39 | 0.002 116 2 | 0.001 316 3 | 2.88 | 0.003 021 3 | 0.001 812 1 |
| 2.40 | 0.002 133 2 | 0.001 325 7 | 2.89 | 0.003 041 4 | 0.001 822 9 |
| 2.41 | 0.002 150 2 | 0.001 335 2 | 2.90 | 0.003 061 5 | 0.001 833 7 |
| 2.42 | 0.002 167 3 | 0.001 344 7 | 2.91 | 0.003 081 7 | 0.001 844 6 |
| 2.43 | 0.002 184 4 | 0.001 354 3 | 2.92 | 0.003 101 9 | 0.001 855 5 |
| 2.44 | 0.002 201 6 | 0.001 363 8 | 2.93 | 0.003 122 2 | 0.001 866 4 |
| 2.45 | 0.002 218 9 | 0.001 373 4 | 2.94 | 0.003 142 6 | 0.001 877 3 |
| 2.46 | 0.002 236 2 | 0.001 383 1 | 2.95 | 0.003 163 0 | 0.001 888 3 |
| 2.47 | 0.002 253 6 | 0.001 392 7 | 2.96 | 0.003 183 5 | 0.001 899 2 |
| 2.48 | 0.002 271 0 | 0.001 402 4 | 2.97 | 0.003 204 1 | 0.001 910 3 |
| 2.49 | 0.002 288 5 | 0.001 412 1 | 2.98 | 0.003 224 7 | 0.001 921 3 |
| 2.50 | 0.002 306 1 | 0.001 421 9 | 2.99 | 0.003 245 4 | 0.001 932 4 |
| 2.51 | 0.002 323 7 | 0.001 431 6 | 3.00 | 0.003 266 1 | 0.001 943 5 |
| 2.52 | 0.002 341 4 | 0.001 441 4 | | | |

166. L'application suivante va faire comprendre la marche à suivre dans l'établissement des tuyaux de conduite d'eau, en faisant usage de la table de Prony (page 128), marche qui serait analogue pour l'établissement des canaux découverts.

*Soit à déterminer le diamètre d'une conduite de* 5 000 *mètres de longueur, capable de débiter* 60 *mètres cubes d'eau par heure, la charge totale, c'est-à-dire la différence de niveau de l'eau dans le réservoir alimentaire et dans le réservoir alimenté étant de* 5 *mètres.*

La dépense par seconde est de $\frac{60\,000}{3\,600} = 16{,}666\,7$ litres.

La charge J (165) par mètre est de $\frac{5}{5\,000} = 0^{m},001$.

Cela posé, on procède par tâtonnement, en essayant différents diamètres :

Pour une conduite de $0^{m},20$ de diamètre, dans les circonstances précédentes, on a

$$\frac{1}{4}\,DJ = \frac{0{,}20 \times 0{,}001}{4} = 0{,}000\,05. \qquad (165)$$

Cherchant dans la table la valeur de $\frac{1}{4}$ DJ qui approche le plus de la valeur 0,000 05 sans la surpasser, on trouve 0,000 048 7 qui correspond à la vitesse moyenne $0^{m},35$ par seconde.

La section de la conduite de $0^{m},20$ de diamètre étant de 3,141 6 décimètres carrés, le débit par seconde est de

$$3{,}141\,6 \times 3{,}5 = 10{,}995\,6 \text{ litres};$$

le diamètre $0^{m},20$ est donc trop faible.

Essayant un diamètre plus grand, $0^{m},24$ par exemple, on a

$$\frac{1}{4}\,DJ = \frac{0{,}24 \times 0{,}001}{4} = 0{,}000\,06,$$

et la table donne pour la valeur de $\frac{1}{4}$ DJ immédiatement inférieure à 0,000 06, 0,000 059 7 qui correspond à la vitesse moyenne $0^{m},39$.

La section du tuyau étant de 4,523 9 décimètres carrés, le débit par seconde est de

$$4{,}523\,9 \times 3{,}9 = 17{,}643\,2 \text{ litres}.$$

Le diamètre $0^{m},24$ est donc un peu fort; mais, à cause des dépôts séléniteux ou vaseux qui se forment dans les tuyaux de conduite, et qui en diminuent la section et par suite le débit, il convient d'adopter $0^{m},24$ pour diamètre de la conduite. Du reste, on déterminerait plus

exactement la diamètre devant satisfaire au tableau de Prony, en continuant le tâtonnement.

**167.** C'est afin d'éviter ces tâtonnements que nous avons calculé la table suivante, qui donne, pour différents diamètres, les dépenses et les charges par mètre de longueur de conduite correspondant à différentes vitesses moyennes de l'eau dans chaque conduite. Les diamètres compris dans cette table sont tels, que chacun d'eux diffère assez peu de ceux immédiatement inférieur et supérieur, pour que le débit à produire sous une certaine charge tombant entre les débits des deux diamètres de la table, sous la même charge, on puisse juger, à la simple inspection, quel serait à peu près le diamètre exact que donnerait la table de Prony, et balancer l'augmentation que l'on juge convenable pour obvier à l'influence des dépôts, sans craindre d'employer un diamètre trop grand, ce qui entraînerait dans des dépenses inutiles.

Lorsqu'on établit une distribution d'eau dans une ville, il convient de ne pas avoir un trop grand nombre de diamètres différents pour les divers embranchements de la conduite, afin de diminuer, autant que possible, les frais de modèles; mais il faut avoir soin aussi de ne pas pécher en sens contraire, c'est-à-dire de ne pas employer des diamètres trop grands pour les débits à produire; car bientôt l'excès de matière contenue dans les tuyaux et l'augmentation du prix des robinets dépasseraient l'économie faite sur les modèles.

Une considération à laquelle il convient d'avoir égard en fixant le débit d'une conduite et par suite son diamètre, c'est de savoir si ce débit est susceptible de devoir être augmenté, par suite d'un accroissement de la population ou de la construction de quelques établissements industriels.

M. Mary a déjà calculé une table analogue à celle qui va suivre, pour les diamètres employés à la distribution des eaux dans Paris. M. Morin a aussi calculé une table analogue à celle de M. Mary.

La première colonne de notre table est commune à tous les diamètres qui se trouvent sur la page, et elle donne les différentes vitesses moyennes de l'eau dans les conduites. La deuxième contient les dépenses correspondant aux vitesses de la première colonne; ces dépenses ont été obtenues en multipliant la section de chaque tuyau par les vitesses moyennes. La troisième renferme les charges J par mètre de longueur de conduite (165), nécessaires pour que les débits soient ceux indiqués dans la deuxième colonne; ces charges ont été déduites de la table de Prony (165), en divisant les différentes valeurs de $\frac{1}{4}$ DJ, correspondant aux vitesses moyennes de la première colonne de notre table, par $\frac{1}{4}$ D.

*TABLE relative à l'établissement des tuyaux de conduite d'eau.*

| VITESSES moyennes. | Diamèt. de la conduite 0m.05 Section *id.* 0mc.0019635 | | Diamèt. de la conduite 0m.06 Section *id.* 0mc.00282744 | | Diamèt. de la conduite 0m.07 Section *id.* 0mc.00384846 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. |
| m. | l. | m. | l. | m. | l. | m. |
| 0.005 | 0.0098 | 0.000 007 62 | 0.0141 | 0.000 006 35 | 0.0192 | 0.000 005 44 |
| 0.01 | 0.0196 | 0.000 016 66 | 0.0283 | 0.000 013 88 | 0.0385 | 0.000 011 90 |
| 0.02 | 0.0393 | 0.000 038 88 | 0.0565 | 0.000 032 40 | 0.0770 | 0.000 027 77 |
| 0.03 | 0.0589 | 0.000 066 68 | 0.0848 | 0.000 055 57 | 0.1155 | 0.000 047 63 |
| 0.04 | 0.0785 | 0.000 100 04 | 0.1131 | 0.000 083 37 | 0.1539 | 0.000 071 46 |
| 0.05 | 0.0982 | 0.000 138 98 | 0.1414 | 0.000 115 82 | 0.1924 | 0.000 099 27 |
| 0.06 | 0.1178 | 0.000 183 48 | 0.1696 | 0.000 152 90 | 0.2309 | 0.000 131 06 |
| 0.07 | 0.1374 | 0.000 233 58 | 0.1979 | 0.000 194 65 | 0.2694 | 0.000 166 84 |
| 0.08 | 0.1571 | 0.000 289 22 | 0.2262 | 0.000 241 02 | 0.3079 | 0.000 206 59 |
| 0.09 | 0 1767 | 0.000 350 46 | 0.2545 | 0.000 292 05 | 0.3464 | 0.000 250 33 |
| 0.10 | 0.1963 | 0.000 417 26 | 0.2827 | 0.000 347 72 | 0.3848 | 0.000 298 04 |
| 0.11 | 0.2160 | 0.000 489 64 | 0.3110 | 0.000 408 03 | 0.4233 | 0.000 349 74 |
| 0.12 | 0.2356 | 0.000 567 58 | 0.3393 | 0.000 472 98 | 0.4618 | 0.000 405 41 |
| 0.13 | 0.2552 | 0.000 651 10 | 0.3676 | 0.000 542 58 | 0.5003 | 0.000 465 07 |
| 0.14 | 0.2749 | 0.000 740 18 | 0.3958 | 0.000 616 82 | 0.5388 | 0.000 528 70 |
| 0.15 | 0.2945 | 0.000 834 84 | 0.4241 | 0.000 695 70 | 0.5773 | 0.000 596 31 |
| 0.16 | 0.3142 | 0.000 935 08 | 0.4524 | 0.000 779 23 | 0.6158 | 0.000 667 91 |
| 0.17 | 0.3338 | 0.001 040 88 | 0.4807 | 0.000 867 40 | 0.6542 | 0.000 743 49 |
| 0.18 | 0.3534 | 0.001 152 26 | 0.5089 | 0.000 960 22 | 0.6927 | 0.000 823 04 |
| 0.19 | 0.3731 | 0.001 269 20 | 0.5372 | 0.001 057 67 | 0.7312 | 0.000 906 57 |
| 0.20 | 0.3927 | 0.001 391 74 | 0.5655 | 0.001 159 78 | 0.7697 | 0.000 994 10 |
| 0.22 | 0.4320 | 0.001 653 50 | 0.6220 | 0.001 377 92 | 0.8467 | 0.001 181 07 |
| 0.25 | 0.4909 | 0.002 087 92 | 0.7069 | 0.001 739 93 | 0.9621 | 0.001 491 37 |
| 0.28 | 0.5498 | 0.002 572 50 | 0.7917 | 0.002 143 75 | 1.0775 | 0.001 837 50 |
| 0.30 | 0.5890 | 0.002 923 42 | 0.8482 | 0.002 436 18 | 1.1545 | 0.002 088 16 |
| 0.32 | 0.6283 | 0.003 296 62 | 0.9048 | 0.002 747 18 | 1.2315 | 0.002 354 73 |
| 0.35 | 0.6872 | 0.003 898 22 | 0.9896 | 0.003 248 52 | 1.3470 | 0.002 784 44 |
| 0.38 | 0.7461 | 0.004 549 96 | 1.0744 | 0.003 791 63 | 1.4624 | 0.003 249 97 |
| 0.40 | 0.7854 | 0.005 012 32 | 1.1310 | 0.004 176 93 | 1.5394 | 0.003 580 23 |
| 0.42 | 0.8247 | 0.005 496 96 | 1.1875 | 0.004 580 80 | 1.6164 | 0.003 926 40 |
| 0.45 | 0.8836 | 0.006 265 72 | 1.2723 | 0.005 221 43 | 1.7318 | 0.004 475 51 |
| 0.48 | 0.9425 | 0.007 084 64 | 1.3572 | 0.005 903 87 | 1.8473 | 0.005 060 40 |
| 0.50 | 0.9817 | 0.007 658 44 | 1.4137 | 0.006 382 03 | 1.9242 | 0.005 470 31 |
| 0.55 | 1.0799 | 0.009 190 44 | 1.5551 | 0.007 658 70 | 2.1166 | 0.006 564 60 |
| 0.60 | 1.1781 | 0.010 861 76 | 1.6965 | 0.009 051 47 | 2.3091 | 0.007 758 40 |
| 0.65 | 1.2763 | 0.012 672 38 | 1.8378 | 0.010 560 32 | 2.5015 | 0.009 051 70 |
| 0.70 | 1.3744 | 0.014 622 32 | 1.9792 | 0.012 185 27 | 2.6939 | 0.010 444 51 |
| 0.75 | 1.4726 | 0.016 711 54 | 2.1206 | 0.013 926 28 | 2.8863 | 0.011 936 81 |
| 0.80 | 1.5708 | 0.018 940 08 | 2.2619 | 0.015 783 40 | 3.0788 | 0.013 528 63 |
| 0.85 | 1.6690 | 0.021 307 90 | 2.4033 | 0.017 756 58 | 3.2712 | 0.015 219 93 |
| 0.90 | 1.7671 | 0.023 815 04 | 2.5447 | 0.019 845 87 | 3.4636 | 0.017 010 74 |

| VITESSES moyennes. | Diamèt. de la conduite 0m.05 Section id. 0mc.0019635 | | Diamèt. de la conduite 0m.06 Section id. 0mc.00282744 | | Diamèt. de la conduite 0m.07 Section id. 0mc.00384846 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. |
| m. | l. | m. | l. | m. | l. | m. |
| 0.95 | 1.8653 | 0.026 461 48 | 2.6861 | 0.022 051 23 | 3.6560 | 0.018 901 06 |
| 1.00 | 1.9635 | 0.029 247 24 | 2.8274 | 0.024 372 70 | 3.8484 | 0.020 890 89 |
| 1.05 | 2.0617 | 0.032 172 28 | 2.9688 | 0.026 810 23 | 4.0409 | 0.022 980 20 |
| 1.10 | 2.1598 | 0.035 236 64 | 3.1102 | 0.029 363 87 | 4.2333 | 0.025 169 03 |
| 1.15 | 2.2580 | 0.038 440 30 | 3.2516 | 0.032 033 58 | 4.4257 | 0.027 457 36 |
| 1.20 | 2.3562 | 0.041 783 26 | 3.3929 | 0.034 819 38 | 4.6181 | 0.029 845 19 |
| 1.25 | 2.4544 | 0.045 265 52 | 3.5343 | 0.037 721 27 | 4.8105 | 0.032 332 51 |
| 1.30 | 2.5525 | 0.048 887 08 | 3.6757 | 0.040 739 23 | 5.0030 | 0.034 919 34 |
| 1.35 | 2.6507 | 0.052 647 96 | 3.8170 | 0.043 873 30 | 5.1954 | 0.037 605 69 |
| 1.40 | 2.7489 | 0.056 548 12 | 3.9584 | 0.047 123 43 | 5.3878 | 0.040 391 51 |
| 1.45 | 2.8471 | 0.060 587 60 | 4.0998 | 0.050 489 67 | 5.5803 | 0.043 276 86 |
| 1.50 | 2.9452 | 0.064 766 38 | 4.2412 | 0.053 971 98 | 5.7727 | 0.046 261 70 |
| 1.55 | 3.0434 | 0.069 084 48 | 4.3825 | 0.057 570 40 | 5.9651 | 0.049 346 06 |
| 1.60 | 3.1416 | 0.073 541 86 | 4.5239 | 0.061 284 88 | 6.1575 | 0.052 529 90 |
| 1.65 | 3.2397 | 0.078 138 56 | 4.6653 | 0.065 115 47 | 6.3499 | 0.055 813 26 |
| 1.70 | 3.3379 | 0.082 874 56 | 4.8066 | 0.069 062 13 | 6.5424 | 0.059 196 11 |
| 1.75 | 3.4361 | 0.087 749 86 | 4.9480 | 0.073 124 88 | 6.7348 | 0.062 678 47 |
| 1.80 | 3.5343 | 0.092 764 46 | 5.0894 | 0.077 303 72 | 6.9272 | 0.066 260 33 |
| 1.85 | 3.6324 | 0.097 918 36 | 5.2308 | 0.081 598 63 | 7.1196 | 0.069 941 69 |
| 1.90 | 3.7306 | 0.103 211 58 | 5.3721 | 0.086 009 65 | 7.3120 | 0.073 722 56 |
| 1.95 | 3.8288 | 0.108 644 08 | 5.5135 | 0.090 536 73 | 7.5045 | 0.077 602 91 |
| 2.00 | 3.9270 | 0.114 215 90 | 5.6549 | 0.095 179 92 | 7.6969 | 0.081 582 79 |
| 2.05 | 4.0251 | 0.119 927 02 | 5.7963 | 0.099 939 18 | 7.8893 | 0.085 662 16 |
| 2.10 | 4.1233 | 0.125 777 46 | 5.9376 | 0.104 814 55 | 8.0817 | 0.089 841 04 |
| 2.15 | 4.2215 | 0.131 767 18 | 6.0790 | 0.109 805 98 | 8.2741 | 0.094 119 41 |
| 2.20 | 4.3197 | 0.137 896 22 | 6.2204 | 0.114 913 52 | 8.4666 | 0.098 497 30 |
| 2.25 | 4.4179 | 0.144 164 54 | 6.3617 | 0.120 137 12 | 8.6590 | 0.102 974 67 |
| 2.30 | 4.5160 | 0.150 572 18 | 6.5031 | 0.125 476 82 | 8.8514 | 0.107 551 56 |
| 2.35 | 4.6142 | 0.157 119 12 | 6.6445 | 0.130 932 60 | 9.0438 | 0.112 227 94 |
| 2.40 | 4.7124 | 0.163 805 38 | 6.7859 | 0.136 504 48 | 9.2362 | 0.117 003 84 |
| 2.45 | 4.8106 | 0.170 630 92 | 6 9272 | 0.142 192 43 | 9.4287 | 0.121 879 23 |
| 2.50 | 4.9087 | 0.177 595 78 | 7.0686 | 0.147 996 48 | 9.6211 | 0.126 854 13 |
| 2 55 | 5.0070 | 0.184 699 94 | 7.2100 | 0.153 916 62 | 9.8135 | 0.131 928 53 |
| 2.60 | 5.1051 | 0.191 943 40 | 7.3513 | 0.159 952 83 | 10.0060 | 0.137 102 43 |
| 2.65 | 5.2032 | 0.199 326 16 | 7.4927 | 0.166 105 13 | 10.1984 | 0.142 375 83 |
| 2.70 | 5.3014 | 0.206 848 24 | 7.6341 | 0.172 373 53 | 10.3908 | 0.147 748 74 |
| 2.75 | 5.3996 | 0.214 509 60 | 7.7755 | 0.178 758 00 | 10.5832 | 0.153 221 14 |
| 2.80 | 5.4978 | 0.222 310 28 | 7.9168 | 0.185 258 57 | 10.7757 | 0.158 793 06 |
| 2.85 | 5.5960 | 0 230 250 26 | 8.0582 | 0.191 875 22 | 10.9681 | 0.164 464 47 |
| 2.90 | 5.6942 | 0.238 329 56 | 8.1996 | 0.198 607 97 | 11.1605 | 0.170 235 40 |
| 2.95 | 5.7923 | 0.246 548 14 | 8.3409 | 0.205 456 78 | 11.3529 | 0.176 105 81 |
| 3.00 | 5.8905 | 0.254 906 04 | 8.4823 | 0.212 421 70 | 11.5454 | 0.182 075 74 |

| VITESSES moyennes. | Diamèt. de la conduite 0m.08 Section *id.* 0mc.00502656 | | Diamèt. de la conduite 0m.09 Section *id.* 0mc.00636174 | | Diamèt. de la conduite 0m.10 Section *id.* 0mc.00785 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. |
| m. | l. | m. | l. | m. | l. | m. |
| 0.005 | 0.0251 | 0.000 004 76 | 0.0318 | 0.000 004 23 | 0.0393 | 0.000 003 81 |
| 0.01 | 0.0503 | 0.000 010 41 | 0.0636 | 0.000 009 26 | 0.0785 | 0.000 008 33 |
| 0.02 | 0.1005 | 0.000 024 30 | 0.1272 | 0.000 021 60 | 0.1571 | 0.000 019 44 |
| 0.03 | 0.1508 | 0.000 041 68 | 0.1908 | 0.000 037 05 | 0.2356 | 0.000 033 34 |
| 0.04 | 0.2011 | 0.000 062 53 | 0.2545 | 0.000 055 58 | 0.3142 | 0.000 050 02 |
| 0.05 | 0.2513 | 0.000 086 86 | 0.3181 | 0.000 077 21 | 0.3927 | 0.000 069 49 |
| 0.06 | 0.3016 | 0.000 114 68 | 0.3817 | 0.000 101 93 | 0.4712 | 0.000 091 74 |
| 0.07 | 0.3519 | 0.000 145 99 | 0.4453 | 0.000 129 77 | 0.5498 | 0.000 116 79 |
| 0.08 | 0.4021 | 0.000 180 76 | 0.5089 | 0.000 160 68 | 0.6283 | 0.000 144 61 |
| 0.09 | 0.4524 | 0.000 219 04 | 0.5726 | 0.000 194 70 | 0.7069 | 0.000 175 23 |
| 0.10 | 0.5027 | 0.000 260 79 | 0.6362 | 0.000 231 81 | 0.7854 | 0.000 208 63 |
| 0.11 | 0.5529 | 0.000 306 03 | 0.6998 | 0.000 272 02 | 0.8639 | 0.000 244 82 |
| 0.12 | 0.6032 | 0.000 354 74 | 0.7634 | 0 000 315 32 | 0.9425 | 0.000 283 79 |
| 0 13 | 0.6535 | 0.000 406 94 | 0.8270 | 0.000 361 72 | 1.0210 | 0.000 325 55 |
| 0.14 | 0.7037 | 0.000 462 61 | 0.8906 | 0.000 411 21 | 1.0996 | 0.000 370 09 |
| 0.15 | 0.7540 | 0.000 521 78 | 0.9543 | 0.000 463 80 | 1.1781 | 0.000 417 42 |
| 0.16 | 0.8042 | 0.000 584 43 | 1.0179 | 0.000 519 49 | 1.2566 | 0.000 467 54 |
| 0.17 | 0.8545 | 0.000 650 55 | 1.0815 | 0.000 578 27 | 1.3352 | 0.000 520 44 |
| 0.18 | 0.9048 | 0.000 720 16 | 1.1451 | 0.000 640 15 | 1.4137 | 0.000 576 13 |
| 0.19 | 0.9550 | 0.000 793 25 | 1.2087 | 0.000 705 11 | 1.4923 | 0.000 634 60 |
| 0.20 | 1.0053 | 0.000 869 84 | 1.2723 | 0.000 773 19 | 1.5708 | 0.000 695 87 |
| 0.22 | 1.1058 | 0.001 033 44 | 1.3996 | 0.000 918 61 | 1.7278 | 0.000 826 75 |
| 0.25 | 1.2566 | 0.001 304 95 | 1.5904 | 0.001 159 96 | 1.9635 | 0.001 043 96 |
| 0.28 | 1.4074 | 0.001 607 81 | 1.7813 | 0.001 429 17 | 2.1992 | 0.001 286 25 |
| 0.30 | 1.5080 | 0.001 827 14 | 1.9085 | 0.001 624 12 | 2.3562 | 0.001 461 71 |
| 0.32 | 1.6085 | 0.002 060 39 | 2.0357 | 0.001 831 46 | 2.5132 | 0.001 648 31 |
| 0.35 | 1.7593 | 0.002 436 39 | 2.2266 | 0.002 165 68 | 2.7489 | 0.001 949 11 |
| 0.38 | 1.9100 | 0.002 843 73 | 2.4175 | 0.002 527 76 | 2.9846 | 0.002 274 98 |
| 0.40 | 2.0106 | 0.003 132 70 | 2.5447 | 0.002 784 62 | 3.1416 | 0.002 506 16 |
| 0.42 | 2.1111 | 0.003 435 60 | 2.6719 | 0.003 053 87 | 3.2986 | 0.002 748 48 |
| 0.45 | 2.2620 | 0.003 916 08 | 2.8628 | 0.003 480 96 | 3.5343 | 0.003 132 86 |
| 0.48 | 2.4127 | 0.004 427 90 | 3.0536 | 0.003 935 91 | 3.7700 | 0.003 542 32 |
| 0.50 | 2.5133 | 0.004 786 53 | 3.1809 | 0.004 254 69 | 3.9270 | 0.003 829 22 |
| 0.55 | 2.7646 | 0.005 744 03 | 3.4989 | 0.005 105 80 | 4.3197 | 0.004 595 22 |
| 0.60 | 3.0159 | 0.006 788 60 | 3.8170 | 0.006 034 31 | 4.7124 | 0.005 430 88 |
| 0.65 | 3.2672 | 0.007 920 24 | 4.1351 | 0.007 040 21 | 5.1051 | 0.006 336 19 |
| 0.70 | 3.5186 | 0.009 138 95 | 4.4532 | 0.008 123 51 | 5.4978 | 0.007 311 16 |
| 0.75 | 3.7699 | 0.010 444 71 | 4.7713 | 0.009 284 19 | 5.8905 | 0.008 355 77 |
| 0.80 | 4.0212 | 0.011 837 55 | 5.0894 | 0.010 522 27 | 6.2832 | 0.009 470 04 |
| 0.85 | 4.2725 | 0 013 317 44 | 5.4075 | 0.011 837 72 | 6.6759 | 0.010 653 95 |
| 0.90 | 4.5239 | 0.014 884 40 | 5.7255 | 0.013 230 58 | 7.0686 | 0.011 907 52 |

| VITESSES moyennes. | Diamèt. de la conduite 0m.08 Section *id.* 0mc.00502656 | | Diamèt. de la conduite 0m.09 Section *id.* 0mc.00636174 | | Diamèt. de la conduite 0m.10 Section *id.* 0mc.007854 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. |
| m. | l. | m. | l. | m. | l. | m. |
| 0.95 | 4.7752 | 0.016 538 43 | 6.0436 | 0.014 700 82 | 7.4613 | 0.013 230 74 |
| 1.00 | 5.0266 | 0.018 279 53 | 6.3617 | 0.016 248 47 | 7.8540 | 0.014 623 62 |
| 1.05 | 5.2779 | 0.020 107 68 | 6.6798 | 0.017 873 49 | 8.2467 | 0.016 086 14 |
| 1.10 | 5.5292 | 0.022 022 90 | 6.9979 | 0.019 575 91 | 8.6394 | 0.017 618 32 |
| 1.15 | 5.7805 | 0.024 025 19 | 7.3160 | 0.021 355 72 | 9.0321 | 0.019 220 15 |
| 1.20 | 6.0319 | 0.026 114 54 | 7.6341 | 0.023 212 92 | 9.4248 | 0.020 891 63 |
| 1.25 | 6.2832 | 0.028 290 95 | 7.9522 | 0.025 147 51 | 9.8175 | 0.022 632 76 |
| 1.30 | 6.5345 | 0.030 554 43 | 8.2702 | 0.027 159 49 | 10.2102 | 0.024 443 54 |
| 1.35 | 6.7858 | 0.032 904 98 | 8.5883 | 0.029 248 87 | 10.6029 | 0.026 323 98 |
| 1.40 | 7.0372 | 0.035 342 58 | 8.9064 | 0.031 415 62 | 10.9956 | 0.028 274 06 |
| 1.45 | 7.2885 | 0.037 867 25 | 9.2245 | 0.033 659 78 | 11.3883 | 0.030 293 80 |
| 1.50 | 7.5398 | 0.040 478 99 | 9.5426 | 0.035 981 32 | 11.7810 | 0.032 383 19 |
| 1.55 | 7.7911 | 0.043 177 80 | 9.8607 | 0.038 380 27 | 12.1737 | 0.034 542 24 |
| 1.60 | 8.0425 | 0.045 963 66 | 10.1788 | 0.040 856 59 | 12.5664 | 0.036 770 93 |
| 1.65 | 8.2937 | 0.048 836 60 | 10.4968 | 0.043 410 31 | 12.9591 | 0.039 069 28 |
| 1.70 | 8.5451 | 0.051 796 60 | 10.8149 | 0.046 041 42 | 13.3518 | 0.041 437 28 |
| 1.75 | 8.7965 | 0.054 843 66 | 11.1330 | 0.048 749 92 | 13.7445 | 0.043 874 93 |
| 1.80 | 9.0478 | 0.057 977 79 | 11.4511 | 0.051 535 81 | 14.1372 | 0.046 382 23 |
| 1.85 | 9.2991 | 0.061 198 98 | 11.7692 | 0.054 399 09 | 14.5299 | 0.048 959 18 |
| 1.90 | 9.5505 | 0.064 507 24 | 12.0873 | 0.057 339 77 | 14.9226 | 0.051 605 79 |
| 1.95 | 9.8018 | 0.067 902 55 | 12.4053 | 0.060 357 82 | 15.3153 | 0.054 322 04 |
| 2.00 | 10.0531 | 0.071 384 94 | 12.7234 | 0.063 453 28 | 15.7081 | 0.057 107 95 |
| 2.05 | 10.3044 | 0.074 954 39 | 13.0415 | 0.066 626 12 | 16.1007 | 0.059 963 51 |
| 2.10 | 10.5558 | 0.078 610 91 | 13.3596 | 0.069 876 37 | 16.4934 | 0.062 888 73 |
| 2.15 | 10.8071 | 0.082 354 49 | 13.6777 | 0.073 203 99 | 16.8861 | 0.065 883 59 |
| 2.20 | 11.0584 | 0.086 185 14 | 13.9958 | 0.076 609 01 | 17.2788 | 0.068 948 11 |
| 3.25 | 11.3097 | 0.090 102 84 | 14.3139 | 0.080 091 41 | 17.6715 | 0.072 082 27 |
| 2.30 | 11.5610 | 0.094 107 61 | 14.6320 | 0.083 651 21 | 18.0642 | 0.075 286 09 |
| 2.35 | 11.8124 | 0.098 199 45 | 14.9501 | 0.087 288 40 | 18.4569 | 0.078 559 56 |
| 2.40 | 12.0637 | 0.102 378 36 | 15.2682 | 0.091 002 99 | 18.8496 | 0.081 902 69 |
| 2.45 | 12.3150 | 0.106 644 33 | 15.5862 | 0.094 794 96 | 19.2423 | 0.085 315 46 |
| 2.50 | 12.5664 | 0.110 997 36 | 15.9043 | 0.098 664 32 | 19.6350 | 0.088 797 89 |
| 2.55 | 12.8177 | 0.115 437 46 | 16.2224 | 0.102 611 08 | 20.0277 | 0.092 349 97 |
| 2.60 | 13.0690 | 0.119 964 63 | 16.5405 | 0.106 635 22 | 20.4204 | 0.095 971 70 |
| 2.65 | 13.3203 | 0.124 578 85 | 16.8586 | 0.110 736 76 | 20.8131 | 0.099 663 08 |
| 2.70 | 13.5717 | 0.129 280 15 | 17.1766 | 0.114 915 69 | 21.2058 | 0.103 424 12 |
| 2.75 | 13.8230 | 0.134 068 50 | 17.4947 | 0.119 172 00 | 21.5985 | 0.107 254 80 |
| 2.80 | 14.0743 | 0.138 943 93 | 17.8128 | 0.123 505 71 | 21.9912 | 0.111 155 14 |
| 2.85 | 14.3256 | 0.143 906 41 | 18.1309 | 0.127 916 81 | 22.3839 | 0.115 125 13 |
| 2.90 | 14.5770 | 0.148 955 98 | 18.4490 | 0.132 405 31 | 22.7766 | 0.119 164 78 |
| 2.95 | 14.8283 | 0.154 092 59 | 18.7671 | 0.136 971 19 | 23.1693 | 0.123 274 07 |
| 3.00 | 15.0797 | 0 159 316 28 | 19.0852 | 0.141 614 47 | 23.5620 | 0.127 453 02 |

| VITESSES moyennes. | Diamèt. de la conduite 0m.11<br>Section *id.* 0mc.00950334 | | Diamèt. de la conduite 0m.12<br>Section *id.* 0mc.01130976 | | Diamèt. de la conduite 0m.1<br>Section *id.* 0mc.0153938 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. |
| m. | l. | m. | l. | m. | l. | m. |
| 0.01 | 0.0950 | 0.000 007 57 | 0.1131 | 0.000 006 94 | 0.1539 | 0.000 005 95 |
| 0.02 | 0.1901 | 0.000 017 67 | 0.2262 | 0.000 016 20 | 0.3079 | 0.000 013 89 |
| 0.03 | 0.2851 | 0.000 030 31 | 0.3393 | 0.000 027 79 | 0.4618 | 0.000 023 82 |
| 0.04 | 0.3801 | 0.000 045 47 | 0.4524 | 0.000 041 69 | 0.6158 | 0.000 035 73 |
| 0.05 | 0.4752 | 0.000 063 17 | 0.5655 | 0.000 057 91 | 0.7697 | 0.000 049 64 |
| 0.06 | 0.5702 | 0.000 083 40 | 0.6786 | 0.000 076 45 | 0.9236 | 0 000 065 53 |
| 0.07 | 0.6652 | 0.000 106 17 | 0.7917 | 0.000 097 33 | 1.0776 | 0.000 083 42 |
| 0.08 | 0.7603 | 0 000 131 46 | 0.9048 | 0.000 120 51 | 1.2315 | 0.000 103 30 |
| 0.09 | 0.8553 | 0.000 159 30 | 1.0179 | 0.000 146 03 | 1.3854 | 0.000 125 17 |
| 0.10 | 0.9503 | 0.000 189 66 | 1.1310 | 0.000 173 86 | 1.5394 | 0.000 149 02 |
| 0.11 | 1.0454 | 0.000 222 56 | 1.2441 | 0.000 204 02 | 1.6933 | 0.000 174 87 |
| 0.12 | 1.1404 | 0.000 257 99 | 1.3572 | 0.000 236 49 | 1.8473 | 0.000 202 71 |
| 0.13 | 1.2354 | 0.000 295 95 | 1.4703 | 0.000 271 29 |  | 0.000 232 56 |
| 0.14 | 1.3305 | 0.000 336 45 | 1.5834 | 0.000 308 41 |  | 0.000 264 35 |
| 0.15 | 1.4255 | 0.000 379 47 | 1.6965 | 0.000 347 85 |  | 0.000 298 16 |
| 0.16 | 1.5205 | 0.000 425 04 | 1.8096 | 0.000 389 61 |  | 0.000 333 96 |
| 0.17 | 1.6156 | 0.000 473 13 | 1.9227 | 0.000 433 70 |  | 0.000 371 75 |
| 0.18 | 1.7106 | 0.000 523 75 | 2.0358 | 0.000 480 11 |  | 0.000 411 52 |
| 0.19 | 1.8056 | 0.000 576 91 | 2.1489 | 0.000 528 84 |  | 0.000 453 29 |
| 0.20 | 1.9007 | 0.000 632 61 | 2.2620 | 0.000 579 89 |  | 0.000 497 11 |
| 0.22 | 2.0907 | 0.000 751 59 | 2.4881 | 0.000 688 96 |  | 0.000 590 58 |
| 0.25 | 2.3758 | 0.000 949 05 | 2.8274 | 0.000 869 97 |  | 0.000 745 69 |
| 0.28 | 2.6609 | 0.001 169 32 | 3.1667 | 0.001 071 88 |  | 0.000 918 72 |
| 0.30 | 2.8510 | 0.001 328 83 | 3.3929 | 0.001 218 09 |  | 0.001 044 08 |
| 0.32 | 3.0411 | 0.001 498 46 | 3.6191 | 0.001 373 59 |  | 0.001 177 57 |
| 0.35 | 3.3262 | 0.001 771 92 | 3.9584 | 0.001 624 26 |  | 0.001 392 22 |
| 0.38 | 3.6113 | 0.002 068 16 | 4.2977 | 0.001 895 82 |  | 0.001 624 90 |
| 0.40 | 3.8013 | 0.002 278 33 | 4.5239 | 0.002 088 47 |  | 0.001 790 12 |
| 0.42 | 3.9914 | 0.002 498 62 | 4.7501 | 0.002 290 40 |  | 0.001 963 20 |
| 0.45 | 4.2765 | 0.002 848 05 | 5.0894 | 0 002 610 72 |  | 0.002 237 70 |
| 0.48 | 4.5616 | 0.003 220 29 | 5.4287 | 0.002 951 94 |  | 0.002 530 24 |
| 0.50 | 4.7517 | 0.003 481 11 | 5.6549 | 0.003 191 02 |  | 0.002 735 10 |
| 0.55 | 5.2268 | 0.004 177 47 | 6.2204 | 0.003 829 35 |  | 0.003 282 38 |
| 0.60 | 5.7020 | 0.004 937 16 | 6.7859 | 0.004 525 74 |  | 0.003 879 20 |
| 0.65 | 6.1772 | 0.005 760 17 | 7.3513 | 0.005 280 16 |  | 0.004 525 85 |
| 0.70 | 6.6523 | 0.006 646 51 | 7.9168 | 0.006 092 64 |  | 0.005 222 26 |
| 0.75 | 7.1275 | 0.007 596 15 | 8.4823 | 0.006 963 14 |  | 0.005 968 41 |
| 0.80 | 7.6027 | 0.008 609 13 | 9.0478 | 0.007 891 70 |  | 0.006 764 32 |
| 0.85 | 8.0778 | 0.009 685 41 | 9.6133 | 0.008 878 29 |  | 0.007 609 97 |
| 0.90 | 8.5530 | 0.010 825 02 | 10.1788 | 0.009 922 93 |  | 0.008 505 37 |
| 0.95 | 9.0282 | 0.012 027 95 | 10.7443 | 0.011 025 62 |  | 0.009 450 53 |

| VITESSES moyennes. | Diamèt. de la conduite 0m.11 Section id. 0mc.00950334 | | Diamèt. de la conduite 0m.12 Section id. 0mc.01130976 | | Diamèt. de la conduite 0m.14 Section id. 0mc.01539384 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. |
| m. | l. | m. | l. | m. | l. | m. |
| 1.00 | 9.5033 | 0.013 294 20 | 11.3098 | 0.012 186 35 | 15.3938 | 0.010 445 45 |
| 1.05 | 9.9785 | 0.014 623 76 | 11.8753 | 0.013 405 12 | 16.1635 | 0.011 490 10 |
| 1.10 | 10.4537 | 0.016 016 65 | 12.4407 | 0.014 681 94 | 16.9332 | 0.012 584 52 |
| 1.15 | 10.9288 | 0.017 472 86 | 13.0062 | 0.016 016 79 | 17.7029 | 0.013 728 68 |
| 1.20 | 11.4040 | 0.018 992 39 | 13.5717 | 0.017 409 69 | 18.4726 | 0.014 922 59 |
| 1.25 | 11.8792 | 0.020 575 24 | 14.1372 | 0.018 860 64 | 19.2423 | 0.016 166 26 |
| 1.30 | 12.3543 | 0.022 221 40 | 14.7027 | 0.020 369 62 | 20.0120 | 0.017 459 67 |
| 1.35 | 12.8295 | 0.023 930 89 | 15.2682 | 0.021 936 65 | 20.7817 | 0.018 802 85 |
| 1.40 | 13.3047 | 0.025 703 69 | 15.8337 | 0.023 561 72 | 21.5514 | 0.020 195 76 |
| 1.45 | 13.7798 | 0.027 539 82 | 16.3992 | 0.025 244 84 | 22.3211 | 0.021 638 43 |
| 1.50 | 14.2550 | 0.029 439 26 | 16.9646 | 0.026 985 99 | 23.0908 | 0.023 130 85 |
| 1.55 | 14.7302 | 0.031 402 04 | 17.5301 | 0.028 785 20 | 23.8604 | 0.024 673 03 |
| 1.60 | 15.2053 | 0.033 428 12 | 18.0956 | 0.030 642 44 | 24.6301 | 0.026 264 95 |
| 1.65 | 15.6805 | 0.035 517 53 | 18.6611 | 0.032 557 74 | 25.3998 | 0.027 906 63 |
| 1.70 | 16.1557 | 0.037 670 25 | 19.2266 | 0.034 531 07 | 26.1695 | 0.029 598 06 |
| 1.75 | 16.6308 | 0.039 886 30 | 19.7921 | 0.036 562 44 | 26.9392 | 0.031 339 24 |
| 1.80 | 17.1060 | 0.042 165 66 | 20.3576 | 0.038 651 86 | 27.7089 | 0.033 130 17 |
| 1.85 | 17.5812 | 0.044 508 35 | 20.9231 | 0.040 799 32 | 28.4786 | 0.034 970 85 |
| 1.90 | 18.0563 | 0.046 914 35 | 21.4885 | 0.043 004 83 | 29.2483 | 0.036 861 28 |
| 1.95 | 18.5315 | 0.049 383 67 | 22.0540 | 0.045 268 37 | 30.0180 | 0.038 801 46 |
| 2.00 | 19.0067 | 0.051 916 32 | 22.6195 | 0.047 589 96 | 30.7877 | 0.040 791 40 |
| 2.05 | 19.4818 | 0.054 512 28 | 23.1850 | 0.049 969 59 | 31.5574 | 0.042 831 08 |
| 2.10 | 19.9570 | 0.057 171 57 | 23.7505 | 0.052 407 28 | 32.3271 | 0.044 920 52 |
| 2.15 | 20.4322 | 0.059 894 17 | 24.3160 | 0.054 902 99 | 33.0968 | 0.047 059 71 |
| 2.20 | 20.9073 | 0.062 680 10 | 24.8815 | 0.057 456 76 | 33.8664 | 0.049 248 65 |
| 2.25 | 21.3825 | 0.065 529 34 | 25.4470 | 0.060 068 56 | 34.6361 | 0.051 487 34 |
| 2.30 | 21.8577 | 0.068 441 90 | 26.0124 | 0.062 738 41 | 35.4058 | 0.053 775 78 |
| 2.35 | 22.3328 | 0.071 417 78 | 26.5779 | 0.065 466 30 | 36.1755 | 0.056 113 97 |
| 2.40 | 22.8080 | 0.074 456 99 | 27.1434 | 0.068 252 24 | 36.9452 | 0.058 501 92 |
| 2.45 | 23.2832 | 0.077 559 51 | 27.7089 | 0.071 096 22 | 37.7149 | 0.060 939 62 |
| 2.50 | 23.7583 | 0.080 725 35 | 28.2744 | 0.073 998 24 | 38.4846 | 0.063 427 07 |
| 2.55 | 24.2335 | 0.083 954 52 | 28.8399 | 0.076 958 31 | 39.2543 | 0.065 964 27 |
| 2.60 | 24.7087 | 0.087 247 00 | 29.4054 | 0.079 976 42 | 40.0240 | 0.068 551 22 |
| 2.65 | 25.1839 | 0.090 602 80 | 29.9709 | 0.083 052 57 | 40.7937 | 0.071 187 92 |
| 2.70 | 25.6590 | 0.094 021 93 | 30.5364 | 0.086 186 77 | 41.5634 | 0.073 874 37 |
| 2.75 | 26.1342 | 0.097 504 36 | 31.1018 | 0.089 379 00 | 42.3331 | 0.076 610 57 |
| 2.80 | 26.6094 | 0.101 050 13 | 31.6673 | 0.092 629 29 | 43.1027 | 0.079 396 53 |
| 2.85 | 27.0845 | 0.104 659 21 | 32.2328 | 0.095 937 61 | 43.8724 | 0.082 232 24 |
| 2.90 | 27.5597 | 0 108 331 62 | 32.7983 | 0.099 303 99 | 44.6421 | 0.085 117 70 |
| 2.95 | 28.0349 | 0.112 067 34 | 33.3638 | 0.102 728 39 | 45.4118 | 0.088 052 91 |
| 3.00 | 28.5100 | 0.115 866 38 | 33.9293 | 0.106 210 85 | 46.1815 | 0.091 037 87 |

| VITESSES moyennes. | Diamèt. de la conduite 0m.15 Section *id.* 0mc.0176715 | | Diamèt. de la conduite 0m.16 Section *id.* 0mc.02010624 | | Diamèt. de la conduite 0m.1 Section *id.* 0mc.0254469 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. |
| m. | l. | m. | l. | m. | l. | m. |
| 0.01 | 0.1767 | 0.000 005 55 | 0.2011 | 0.000 005 21 | 0.2545 | 0.000 004 63 |
| 0.02 | 0.3534 | 0.000 012 96 | 0.4021 | 0.000 012 15 | 0.5089 | 0.000 010 80 |
| 0.03 | 0.5301 | 0.000 022 23 | 0.6032 | 0.000 020 84 | 0.7634 | 0.000 018 53 |
| 0.04 | 0.7069 | 0.000 033 35 | 0.8042 | 0.000 031 27 | 1.0179 | 0.000 027 79 |
| 0.05 | 0.8836 | 0.000 046 33 | 1.0053 | 0.000 043 43 | 1.2723 | 0.000 038 61 |
| 0.06 | 1.0603 | 0.000 061 16 | 1.2064 | 0.000 057 34 | 1.5268 | 0.000 050 97 |
| 0.07 | 1.2370 | 0.000 077 86 | 1.4074 | 0.000 073 00 | 1.7813 | 0.000 064 89 |
| 0.08 | 1.4137 | 0.000 096 41 | 1.6085 | 0.000 090 38 | 2.0358 | 0.000 080 34 |
| 0.09 | 1.5904 | 0.000 116 82 | 1.8096 | 0.000 109 52 | 2.2902 | 0.000 097 35 |
| 0.10 | 1.7671 | 0.000 139 09 | 2.0106 | 0.000 130 40 | 2.5447 | 0.000 115 91 |
| 0.11 | 1.9439 | 0.000 163 21 | 2.2117 | 0.000 153 02 | 2.7992 | 0.000 136 01 |
| 0.12 | 2.1206 | 0.000 189 19 | 2.4127 | 0.000 177 37 | 3.0536 | 0.000 157 68 |
| 0.13 | 2.2973 | 0.000 217 03 | 2.6138 | 0.000 203 47 | 3.3081 | 0.000 180 86 |
| 0.14 | 2.4740 | 0.000 246 73 | 2.8149 | 0.000 231 31 | 3.5626 | 0.000 205 61 |
| 0.15 | 2.6507 | 0.000 278 28 | 3.0159 | 0.000 260 89 | 3.8170 | 0.000 231 90 |
| 0.16 | 2.8274 | 0.000 311 69 | 3.2170 | 0.000 292 22 | 4.0715 | 0.000 259 73 |
| 0.17 | 3.0042 | 0.000 346 96 | 3.4181 | 0.000 325 28 | 4.3260 | 0.000 289 14 |
| 0.18 | 3.1809 | 0.000 384 09 | 3.6191 | 0.000 360 08 | 4.5805 | 0.000 320 08 |
| 0.19 | 3.3576 | 0.000 423 07 | 3.8202 | 0.000 396 63 | 4.8349 | 0.000 352 56 |
| 0.20 | 3.5343 | 0.000 463 91 | 4.0212 | 0.000 434 92 | 5.0894 | 0.000 386 60 |
| 0.22 | 3.8877 | 0.000 551 17 | 4.4234 | 0.000 516 72 | 5.5983 | 0.000 459 31 |
| 0.25 | 4.4179 | 0.000 695 97 | 5.0266 | 0.000 652 48 | 6.3617 | 0.000 579 98 |
| 0.28 | 4.9480 | 0.000 857 50 | 5.6297 | 0.000 803 91 | 7.1251 | 0.000 714 59 |
| 0.30 | 5.3014 | 0.000 974 47 | 6.0319 | 0.000 913 57 | 7.6341 | 0.000 812 06 |
| 0.32 | 5.6549 | 0.001 098 87 | 6.4340 | 0.001 030 20 | 8.1430 | 0.000 915 73 |
| 0.35 | 6.1850 | 0.001 299 41 | 7.0372 | 0.001 218 20 | 8.9064 | 0.001 082 84 |
| 0.38 | 6.7152 | 0.001 516 65 | 7.6404 | 0.001 421 87 | 9.6698 | 0.001 263 88 |
| 0.40 | 7.0686 | 0.001 670 77 | 8.0425 | 0.001 566 35 | 10.1788 | 0.001 392 31 |
| 0.42 | 7.4220 | 0.001 832 32 | 8.4446 | 0.001 717 80 | 10.6877 | 0.001 526 94 |
| 0.45 | 7.9522 | 0.002 088 57 | 9.0478 | 0.001 958 04 | 11.4511 | 0.001 740 48 |
| 0.48 | 8.4823 | 0.002 361 55 | 9.6510 | 0.002 213 95 | 12.2145 | 0.001 967 96 |
| 0.50 | 8.8357 | 0.002 552 81 | 10.0531 | 0.002 393 27 | 12.7235 | 0.002 127 35 |
| 0.55 | 9.7193 | 0.003 063 48 | 11.0584 | 0.002 872 02 | 13.9958 | 0.002 552 90 |
| 0.60 | 10.6029 | 0.003 620 59 | 12.0637 | 0.003 394 30 | 15.2682 | 0.003 017 16 |
| 0.65 | 11.4865 | 0.004 224 13 | 13.0690 | 0.003 960 12 | 16.5405 | 0.003 520 11 |
| 0.70 | 12.3700 | 0.004 874 11 | 14.0744 | 0.004 569 48 | 17.8129 | 0.004 061 75 |
| 0.75 | 13.2536 | 0.005 570 51 | 15.0797 | 0.005 222 36 | 19.0852 | 0.004 642 10 |
| 0.80 | 14.1372 | 0.006 313 36 | 16.0850 | 0.005 918 78 | 20.3576 | 0.005 261 14 |
| 0.85 | 15.0208 | 0.007 102 63 | 17.0903 | 0.006 658 72 | 21.6299 | 0.005 918 86 |
| 0.90 | 15.9043 | 0.007 938 35 | 18.0956 | 0.007 442 20 | 22.9023 | 0.006 615 29 |
| 0.95 | 16.7879 | 0.008 820 49 | 19.1009 | 0.008 269 22 | 24.1746 | 0.007 350 41 |

| VITESSES moyennes. | Diamèt. de la conduite 0m.15 Section *id.* 0mc.0176715 | | Diamèt. de la conduite 0m.16 Section *id.* 0mc.02010624 | | Diamèt. de la conduite 0m.18 Section *id.* 0mc.02544696 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. |
| m. | l. | m. | l. | m. | l. | m. |
| 1.00 | 17.6715 | 0.009 749 08 | 20.1062 | 0.009 139 77 | 25.4470 | 0.008 124 24 |
| 1.05 | 18.5550 | 0.010 724 09 | 21.1115 | 0.010 053 84 | 26.7193 | 0.008 936 75 |
| 1.10 | 19.4386 | 0.011 745 55 | 22.1169 | 0.011 011 45 | 27 9917 | 0.009 787 96 |
| 1.15 | 20.3222 | 0.012 813 43 | 23.1222 | 0.012 012 60 | 29.2640 | 0.010 677 86 |
| 1.20 | 21.2058 | 0.013 927 75 | 24.1275 | 0.013 057 27 | 30.5364 | 0.011 606 46 |
| 1.25 | 22.0893 | 0.015 088 51 | 25.1328 | 0.014 145 48 | 31.8087 | 0.012 573 76 |
| 1.30 | 22.9729 | 0.016 295 69 | 26.1381 | 0.015 277 22 | 33.0810 | 0.013 579 75 |
| 1.35 | 23.8565 | 0.017 549 32 | 27.1434 | 0.016 452 49 | 34.3534 | 0.014 624 44 |
| 1.40 | 24.7401 | 0.018 849 37 | 28.1487 | 0.017 671 29 | 35.6257 | 0.015 707 81 |
| 1.45 | 25.6237 | 0.020 195 87 | 29.1540 | 0.018 933 63 | 36.8981 | 0.016 829 89 |
| 1.50 | 26.5072 | 0.021 588 79 | 30.1594 | 0.020 239 50 | 38.1704 | 0.017 990 66 |
| 1.55 | 27.3908 | 0.023 028 16 | 31.1647 | 0.021 588 90 | 39.4428 | 0.019 190 13 |
| 1.60 | 28.2744 | 0.024 513 95 | 32.1700 | 0.022 981 83 | 40.7151 | 0.020 428 30 |
| 1.65 | 29.1580 | 0.026 046 19 | 33.1753 | 0.024 418 30 | 41.9875 | 0.021 705 16 |
| 1.70 | 30.0415 | 0.027 624 85 | 34.1806 | 0.025 898 30 | 43.2598 | 0.023 020 71 |
| 1.75 | 30.9251 | 0.029 249 95 | 35.1859 | 0.027 421 83 | 44.5322 | 0.024 374 96 |
| 1.80 | 31.8087 | 0.030 921 49 | 36.1912 | 0.028 988 90 | 45.8045 | 0.025 767 91 |
| 1.85 | 32.6922 | 0.032 639 45 | 37.1965 | 0.030 599 49 | 47.0769 | 0.027 199 55 |
| 1.90 | 33.5758 | 0.034 403 86 | 38.2019 | 0.032 253 62 | 48.3492 | 0.028 669 89 |
| 1.95 | 34.4594 | 0.036 214 69 | 39.2072 | 0.033 951 28 | 49.6216 | 0.030 178 91 |
| 2.00 | 35.3430 | 0.038 071 97 | 40.2125 | 0.035 692 47 | 50.8939 | 0.031 726 64 |
| 2.05 | 36.2265 | 0.039 975 67 | 41.2178 | 0.037 477 40 | 52.1663 | 0.033 313 06 |
| 2.10 | 37.1101 | 0.041 925 82 | 42.2231 | 0.039 305 46 | 53.4386 | 0.034 938 19 |
| 2.15 | 37.9937 | 0.043 922 39 | 43.2284 | 0.041 177 25 | 54.7110 | 0.036 602 00 |
| 2.20 | 38.8772 | 0.045 965 41 | 44.2337 | 0.043 092 57 | 55.9833 | 0.038 304 51 |
| 2.25 | 39.7608 | 0.048 054 85 | 45.2390 | 0.045 051 42 | 57.2557 | 0.040 045 71 |
| 2.30 | 40.6444 | 0.050 190 73 | 46.2443 | 0.047 053 81 | 58.5280 | 0.041 825 61 |
| 2.35 | 41.5279 | 0.052 373 04 | 47.2496 | 0.049 099 73 | 59.8004 | 0.043 644 20 |
| 2.40 | 42.4115 | 0.054 601 79 | 48.2550 | 0.051 189 18 | 61.0727 | 0.045 501 50 |
| 2.45 | 43.2951 | 0.056 876 97 | 49.2603 | 0.053 322 17 | 62.3451 | 0.047 397 48 |
| 2.50 | 44.1787 | 0.059 198 59 | 50.2656 | 0.055 498 68 | 63.6174 | 0.049 332 16 |
| 2.55 | 45.0623 | 0.061 566 65 | 51.2709 | 0.057 718 73 | 64.8897 | 0.051 305 54 |
| 2.60 | 45.9458 | 0.063 981 13 | 52.2762 | 0.059 982 32 | 66.1620 | 0.053 317 61 |
| 2.65 | 46.8294 | 0.066 442 05 | 53.2815 | 0.062 289 43 | 67.4344 | 0.055 368 38 |
| 2.70 | 47.7130 | 0.068 949 41 | 54.2868 | 0.064 640 08 | 68.7068 | 0.057 457 85 |
| 2.75 | 48.5966 | 0.071 503 20 | 55.2921 | 0.067 034 25 | 69.9791 | 0.059 586 00 |
| 2.80 | 49.4802 | 0.074 103 43 | 56.2975 | 0.069 471 97 | 71.2515 | 0.061 752 86 |
| 2.85 | 50.3637 | 0.076 750 09 | 57.3028 | 0.071 953 21 | 72.5238 | 0.063 958 41 |
| 2.90 | 51.2473 | 0.079 443 19 | 58.3081 | 0.074 477 99 | 73.7962 | 0.066 202 66 |
| 2.95 | 52.1309 | 0.082 182 71 | 59.3135 | 0.077 046 30 | 75.0685 | 0.068 485 60 |
| 3.00 | 53.0145 | 0.084 968 68 | 60.3187 | 0.079 658 14 | 76.3409 | 0.070 807 24 |

| VITESSES moyennes. | Diamèt. de la conduite 0m.20 Section *id.* 0mc.031416 | | Diamèt. de la conduite 0m.22 Section *id.* 0mc.03801336 | | Diamèt. de la conduite 0m.24 Section *id.* 0mc.04523904 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. |
| m. | l. | m. | l. | m. | l. | m. |
| 0.01 | 0.3142 | 0.000 004 17 | 0.3801 | 0.000 003 79 | 0.4524 | 0.000 003 47 |
| 0.02 | 0.6283 | 0.000 009 72 | 0.7603 | 0.000 008 84 | 0 9048 | 0.000 008 10 |
| 0.03 | 0.9425 | 0.000 016 67 | 1.1404 | 0.000 015 16 | 1.3572 | 0.000 013 90 |
| 0.04 | 1.2566 | 0.000 025 01 | 1.5205 | 0.000 022 74 | 1.8096 | 0.000 020 85 |
| 0.05 | 1.5708 | 0.000 034 75 | 1.9007 | 0.000 031 59 | 2.2619 | 0.000 028 96 |
| 0.06 | 1.8850 | 0.000 045 87 | 2.2808 | 0.000 041 70 | 2.7143 | 0.000 038 23 |
| 0.07 | 2.1991 | 0.000 058 40 | 2.6609 | 0.000 053 09 | 3.1667 | 0.000 048 67 |
| 0.08 | 2.5133 | 0.000 072 31 | 3.0411 | 0.000 065 73 | 3.6191 | 0.000 060 26 |
| 0.09 | 2.8274 | 0.000 087 62 | 3.4212 | 0.000 079 65 | 4.0715 | 0.000 073 02 |
| 0.10 | 3.1416 | 0.000 104 32 | 3.8013 | 0.000 094 83 | 4.5239 | 0.000 086 93 |
| 0.11 | 3.4558 | 0.000 122 41 | 4.1815 | 0.000 111 28 | 4.9763 | 0.000 102 01 |
| 0.12 | 3.7699 | 0.000 141 90 | 4.5616 | 0.000 129 00 | 5.4287 | 0.000 118 25 |
| 0.13 | 4.0841 | 0.000 162 78 | 4.9417 | 0.000 147 98 | 5.8811 | 0.000 135 65 |
| 0.14 | 4.3982 | 0.000 185 05 | 5.3219 | 0.000 168 23 | 6.3335 | 0.000 154 21 |
| 0.15 | 4.7124 | 0.000 208 71 | 5.7020 | 0.000 189 74 | 6.7859 | 0.000 173 93 |
| 0.16 | 5.0265 | 0.000 233 77 | 6.0821 | 0.000 212 52 | 7.2382 | 0.000 194 81 |
| 0.17 | 5.3407 | 0.000 260 22 | 6.4623 | 0.000 236 57 | 7.6906 | 0.000 216 85 |
| 0.18 | 5.6549 | 0.000 288 07 | 6.8424 | 0.000 261 88 | 8.1430 | 0.000 240 06 |
| 0.19 | 5.9690 | 0.000 317 30 | 7.2225 | 0.000 288 46 | 8.5954 | 0.000 264 42 |
| 0.20 | 6.2832 | 0.000 347 94 | 7.6027 | 0.000 316 31 | 9.0478 | 0.000 289 95 |
| 0.22 | 6.9116 | 0.000 413 38 | 8.3629 | 0.000 375 80 | 9.9526 | 0.000 344 48 |
| 0.25 | 7.8540 | 0.000 521 98 | 9.5033 | 0.000 474 53 | 11.3098 | 0.000 434 99 |
| 0.28 | 8.7964 | 0.000 643 13 | 10.6437 | 0.000 584 66 | 12.6669 | 0.000 535 94 |
| 0.30 | 9.4248 | 0.000 730 86 | 11.4040 | 0.000 664 42 | 13.5717 | 0.000 609 05 |
| 0.32 | 10.0531 | 0.000 824 16 | 12.1643 | 0.000 749 23 | 14.4765 | 0.000 686 80 |
| 0.35 | 10.9956 | 0.000 974 56 | 13.3047 | 0.000 885 96 | 15.8337 | 0.000 812 13 |
| 0.38 | 11.9380 | 0.001 137 49 | 14.4450 | 0 001 034 08 | 17.1908 | 0.000 947 91 |
| 0.40 | 12.5664 | 0.001 253 08 | 15.2053 | 0.001 139 17 | 18.0956 | 0.001 044 24 |
| 0.42 | 13.1947 | 0.001 374 24 | 15.9656 | 0.001 249 31 | 19.0004 | 0.001 145 20 |
| 0.45 | 14.1372 | 0.001 566 43 | 17.1060 | 0.001 424 03 | 20.3576 | 0.001 305 36 |
| 0.48 | 15.0797 | 0.001 771 16 | 18.2464 | 0.001 610 15 | 21.7147 | 0.001 475 97 |
| 0.50 | 15.7080 | 0.001 914 61 | 19.0067 | 0.001 740 56 | 22.6195 | 0.001 595 51 |
| 0.55 | 17.2788 | 0.002 297 61 | 20.9073 | 0.002 088 74 | 24.8815 | 0.001 914 68 |
| 0.60 | 18.8496 | 0.002 715 44 | 22.8080 | 0.002 468 58 | 27.1434 | 0.002 262 87 |
| 0.65 | 20.4204 | 0.003 168 10 | 24.7087 | 0.002 880 09 | 29.4054 | 0.002 640 08 |
| 0.70 | 21.9912 | 0.003 655 58 | 26.6094 | 0.003 323 26 | 31.6673 | 0 003 046 32 |
| 0.75 | 23.5620 | 0.004 177 89 | 28.5100 | 0.003 798 08 | 33.9293 | 0.003 481 57 |
| 0.80 | 25.1328 | 0.004 735 02 | 30.4107 | 0.004 304 57 | 36.1912 | 0.003 945 85 |
| 0.85 | 26.7036 | 0.005 326 98 | 32.3114 | 0.004 842 71 | 38.4532 | 0.004 439 15 |
| 0.90 | 28.2744 | 0.005 953 76 | 34.2120 | 0.005 412 51 | 40.7151 | 0.004 961 47 |
| 0.95 | 29.8452 | 0.006 615 37 | 36.1127 | 0 006 013 98 | 42.9771 | 0.005 512 81 |

| VITESSES moyennes. | Diamèt. de la conduite 0m.20 Section *id.* 0mc.031416 | | Diamèt. de la conduite 0m.22 Section *id.* 0mc.03801336 | | Diamèt. de la conduite 0m.24 Section *id.* 0mc.04523904 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. |
| m. | l. | m. | l. | m. | l. | m. |
| 1.00 | 31.4160 | 0.007 311 81 | 38.0134 | 0.006 647 10 | 45.2390 | 0.006 093 18 |
| 1.05 | 32.9868 | 0.008 043 07 | 39.9140 | 0.007 311 88 | 47.5010 | 0.006 702 56 |
| 1.10 | 34.5576 | 0.008 809 16 | 41.8147 | 0.008 008 33 | 49.7629 | 0.007 340 97 |
| 1.15 | 36.1284 | 0.009 610 08 | 43.7154 | 0.008 736 43 | 52.0249 | 0.008 008 40 |
| 1.20 | 37.6992 | 0.010 445 82 | 45.6160 | 0.009 496 20 | 54.2868 | 0.008 704 85 |
| 1.25 | 39.2700 | 0.011 316 38 | 47.5167 | 0.010 287 62 | 56.5488 | 0.009 430 32 |
| 1.30 | 40.8408 | 0.012 221 77 | 49.4174 | 0.011 110 70 | 58.8108 | 0.010 184 81 |
| 1.35 | 42.4116 | 0.013 161 99 | 51.3180 | 0.011 965 45 | 61.0727 | 0.010 968 33 |
| 1.40 | 43.9824 | 0.014 137 03 | 53.2187 | 0.012 851 85 | 63.3347 | 0.011 780 86 |
| 1.45 | 45.5532 | 0.015 146 90 | 55.1194 | 0.013 769 91 | 65.5966 | 0.012 622 42 |
| 1.50 | 47.1240 | 0.016 191 60 | 57.0200 | 0.014 719 63 | 67.8586 | 0.013 493 00 |
| 1.55 | 48.6948 | 0.017 271 12 | 58.9207 | 0.015 701 02 | 70.1205 | 0.014 392 60 |
| 1.60 | 50.2656 | 0.018 385 47 | 60.8214 | 0.016 714 06 | 72.3825 | 0.015 321 22 |
| 1.65 | 51.8364 | 0.019 534 64 | 62.7220 | 0.017 758 77 | 74.6444 | 0.016 278 87 |
| 1.70 | 53.4072 | 0.020 718 64 | 64.6227 | 0.018 835 13 | 76.9064 | 0.017 265 54 |
| 1.75 | 54.9780 | 0.021 937 47 | 66.5234 | 0.019 943 15 | 79.1683 | 0.018 281 22 |
| 1.80 | 56.5488 | 0.023 191 12 | 68.4240 | 0.021 082 83 | 81.4303 | 0.019 325 93 |
| 1.85 | 58.1196 | 0.024 479 59 | 70.3247 | 0.022 254 18 | 83.6922 | 0.020 399 66 |
| 1.90 | 59.6904 | 0.025 802 90 | 72.2254 | 0.023 457 18 | 85.9542 | 0.021 502 42 |
| 1.95 | 61.2612 | 0.027 161 02 | 74.1261 | 0.024 691 84 | 88.2161 | 0.022 634 19 |
| 2.00 | 62.8320 | 0.028 553 98 | 76.0267 | 0.025 958 16 | 90.4781 | 0.023 794 98 |
| 2.05 | 64.4028 | 0.029 981 76 | 77.9274 | 0.027 256 14 | 92.7400 | 0.024 984 80 |
| 2.10 | 65.9736 | 0.031 444 37 | 79.8281 | 0.028 585 79 | 95.0020 | 0.026 203 64 |
| 2.15 | 67.5444 | 0.032 941 80 | 81.7287 | 0.029 947 09 | 97.2639 | 0.027 451 50 |
| 2.20 | 69.1152 | 0.034 474 06 | 83.6294 | 0.031 340 05 | 99.5259 | 0.028 728 38 |
| 2.25 | 70.6860 | 0.036 041 14 | 85.5301 | 0.032 764 67 | 101.7878 | 0.030 034 28 |
| 2.30 | 72.2568 | 0.037 643 05 | 87.4307 | 0.034 220 95 | 104.0498 | 0.031 369 21 |
| 2.35 | 73.8276 | 0.039 279 78 | 89.3314 | 0.035 708 89 | 106.3117 | 0.032 733 15 |
| 2.40 | 75.3984 | 0.040 951 35 | 91.2321 | 0.037 228 50 | 108.5737 | 0.034 126 12 |
| 2.45 | 76.9692 | 0.042 657 73 | 93.1327 | 0.038 779 76 | 110.8356 | 0.035 548 11 |
| 2.50 | 78.5400 | 0.044 398 95 | 95.0334 | 0.040 362 68 | 113.0976 | 0.036 999 12 |
| 2.55 | 80.1108 | 0.046 174 99 | 96.9341 | 0.041 977 26 | 115.3595 | 0.038 479 16 |
| 2.60 | 81.6816 | 0.047 985 85 | 98.8347 | 0.043 623 50 | 117.6215 | 0.039 988 21 |
| 2.65 | 83.2524 | 0.049 831 54 | 100.7354 | 0.045 301 40 | 119.8835 | 0.041 526 29 |
| 2.70 | 84.8232 | 0.051 712 06 | 102.6361 | 0.047 010 97 | 122.1454 | 0.043 093 39 |
| 2.75 | 86.3940 | 0.053 627 40 | 104.5367 | 0.048 752 18 | 124.4074 | 0.044 689 50 |
| 2.80 | 87.9648 | 0.055 577 57 | 106.4374 | 0.050 525 07 | 126.6693 | 0.046 314 65 |
| 2.85 | 89.5356 | 0.057 562 57 | 108.3381 | 0.052 329 61 | 128.9313 | 0.047 968 81 |
| 2.90 | 91.1064 | 0.059 582 39 | 110.2387 | 0.054 165 81 | 131.1932 | 0.049 652 00 |
| 2.95 | 92.6772 | 0.061 637 04 | 112.1394 | 0.056 033 67 | 133.4552 | 0.051 364 20 |
| 3.00 | 94.2480 | 0.063 726 51 | 114.0401 | 0.057 933 19 | 135.7171 | 0.053 105 43 |

| VITESSES moyennes. | Diamèt. de la conduite 0m.25 Section *id.* 0mc.0490875 | | Diamèt. de la conduite 0m.28 Section *id.* 0mc.06157536 | | Diamèt. de la conduite 0m,30 Section *id.* 0mc.070680 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. |
| m. | l. | m. | l. | m. | l. | m. |
| 0.01 | 0.4909 | 0.000 003 33 | 0.6158 | 0.000 002 98 | 0.7069 | 0.000 002 78 |
| 0.02 | 0.9817 | 0.000 007 78 | 1.2315 | 0.000 006 95 | 1.4137 | 0.000 006 48 |
| 0.03 | 1.4726 | 0.000 013 34 | 1.8473 | 0.000 011 91 | 2.1206 | 0.000 011 12 |
| 0.04 | 1.9635 | 0.000 020 01 | 2.4630 | 0.000 017 87 | 2.8274 | 0.000 016 68 |
| 0.05 | 2.4544 | 0.000 027 80 | 3.0788 | 0.000 024 82 | 3.5343 | 0.000 023 17 |
| 0.06 | 2.9452 | 0.000 036 70 | 3.6945 | 0.000 032 77 | 4.2412 | 0.000 030 58 |
| 0.07 | 3.4361 | 0.000 046 72 | 4.3103 | 0.000 041 71 | 4.9480 | 0.000 038 93 |
| 0.08 | 3.9270 | 0.000 057 84 | 4.9260 | 0.000 051 65 | 5.6549 | 0.000 048 21 |
| 0.09 | 4.4179 | 0.000 070 09 | 5.5418 | 0.000 062 59 | 6.3617 | 0.000 058 41 |
| 0.10 | 4.9087 | 0.000 083 45 | 6.1575 | 0.000 074 51 | 7.0686 | 0.000 069 55 |
| 0.11 | 5.3996 | 0.000 097 93 | 6.7733 | 0.000 087 44 | 7.7755 | 0.000 081 61 |
| 0.12 | 5.8905 | 0.000 113 52 | 7.3890 | 0.000 101 36 | 8.4823 | 0.000 094 60 |
| 0.13 | 6.3814 | 0.000 130 22 | 8.0048 | 0.000 116 27 | 9.1892 | 0.000 108 52 |
| 0.14 | 6.8722 | 0.000 148 04 | 8.6205 | 0.000 132 18 | 9.8960 | 0.000 123 37 |
| 0.15 | 7.3631 | 0.000 166 97 | 9.2363 | 0.000 149 08 | 10.6029 | 0.000 139 14 |
| 0.16 | 7.8540 | 0.000 187 02 | 9.8521 | 0.000 166 98 | 11.3098 | 0.000 155 85 |
| 0.17 | 8.3449 | 0.000 208 18 | 10.4678 | 0.000 185 88 | 12.0166 | 0.000 173 48 |
| 0.18 | 8.8357 | 0.000 230 45 | 11.0836 | 0.000 205 76 | 12.7235 | 0.000 192 05 |
| 0.19 | 9.3266 | 0.000 253 84 | 11.6993 | 0.000 226 64 | 13.4303 | 0.000 211 54 |
| 0.20 | 9.8175 | 0.000 278 35 | 12.3151 | 0.000 248 58 | 14.1372 | 0.000 231 96 |
| 0.22 | 10.7992 | 0.000 330 70 | 13.5466 | 0.000 295 27 | 15.5509 | 0.000 275 59 |
| 0.25 | 12.2719 | 0.000 417 58 | 15.3938 | 0.000 372 85 | 17.6715 | 0.000 347 99 |
| 0.28 | 13.7445 | 0.000 514 50 | 17.2411 | 0.000 459 38 | 19.7921 | 0.000 428 75 |
| 0.30 | 14.7262 | 0.000 584 68 | 18.4726 | 0.000 522 04 | 21.2058 | 0.000 487 24 |
| 0.32 | 15.7080 | 0.000 659 32 | 19.7041 | 0.000 588 69 | 22.6195 | 0.000 549 44 |
| 0.35 | 17.1806 | 0.000 779 64 | 21.5514 | 0.000 696 11 | 24.7401 | 0.000 649 71 |
| 0.38 | 18.6532 | 0.000 909 99 | 23.3986 | 0.000 812 50 | 26.8607 | 0.000 758 33 |
| 0.40 | 19.6350 | 0.001 002 46 | 24.6301 | 0.000 895 06 | 28.2744 | 0.000 835 39 |
| 0.42 | 20.6167 | 0.001 099 39 | 25.8616 | 0.000 981 60 | 29.6881 | 0.000 916 16 |
| 0.45 | 22.0894 | 0.001 253 14 | 27.7089 | 0.001 118 88 | 31.8087 | 0.001 044 29 |
| 0.48 | 23.5620 | 0.001 416 93 | 29.5562 | 0.001 265 12 | 33.9293 | 0.001 180 78 |
| 0.50 | 24.5437 | 0.001 531 69 | 30.7877 | 0.001 367 58 | 35.3430 | 0.001 276 41 |
| 0.55 | 26.9981 | 0.001 838 09 | 33.8664 | 0.001 641 15 | 38.8773 | 0.001 531 74 |
| 0.60 | 29.4525 | 0.002 172 35 | 36.9452 | 0.001 939 60 | 42.4116 | 0.001 810 30 |
| 0.65 | 31.9069 | 0.002 534 48 | 40.0240 | 0.002 262 93 | 45.9459 | 0.002 112 07 |
| 0.70 | 34.3612 | 0.002 924 46 | 43.1027 | 0.002 611 13 | 49.4802 | 0.002 437 06 |
| 0.75 | 36.8156 | 0.003 342 31 | 46.1815 | 0.002 984 21 | 53.0145 | 0.002 785 26 |
| 0.80 | 39.2700 | 0.003 788 02 | 49.2603 | 0.003 882 16 | 56.5488 | 0.003 156 68 |
| 0.85 | 41.7244 | 0.004 261 58 | 52.3391 | 0.003 804 99 | 60.0831 | 0.003 551 32 |
| 0.90 | 44.1787 | 0.004 763 01 | 55.4178 | 0.004 252 69 | 63.6174 | 0.003 969 18 |
| 0.95 | 46.6331 | 0.005 292 30 | 58.4966 | 0.004 725 27 | 67.1517 | 0.004 410 25 |

| VITESSES moyennes. | Diamèt. de la conduite 0m.25 Section *id.* 0mc.0490875 | | Diamèt. de la conduite 0m.28 Section *id.* 0mc.06157536 | | Diamèt. de la conduite 0m.30 Section *id.* 0mc.070686 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. |
| m. | l. | m. | l. | m. | l. | m. |
| 1.00 | 49.0875 | 0.005 849 45 | 61.5754 | 0.005 222 73 | 70.6860 | 0.004 874 54 |
| 1.05 | 51.5418 | 0.006 434 46 | 64.6541 | 0.005 745 05 | 74.2203 | 0.005 362 05 |
| 1.10 | 53.9962 | 0.007 047 33 | 67.7329 | 0.006 292 26 | 77.7546 | 0.005 872 78 |
| 1.15 | 56.4506 | 0.007 688 06 | 70.8117 | 0.006 864 34 | 81.2889 | 0.006 406 72 |
| 1.20 | 58.9050 | 0.008 356 65 | 73.8904 | 0.007 461 30 | 84.8232 | 0.006 963 88 |
| 1.25 | 61.3593 | 0.009 053 10 | 76.9692 | 0.008 083 13 | 88.3575 | 0.007 544 26 |
| 1.30 | 63.8137 | 0.009 777 42 | 80.0480 | 0.008 729 84 | 91.8918 | 0.008 147 85 |
| 1.35 | 66.2681 | 0.010 529 59 | 83.1267 | 0.009 401 43 | 95.4261 | 0.008 774 66 |
| 1.40 | 68.7225 | 0.011 309 62 | 86.2055 | 0.010 097 88 | 98.9604 | 0.009 424 69 |
| 1.45 | 71.1769 | 0.012 117 52 | 89.2843 | 0.010 819 22 | 102.4947 | 0.010 097 94 |
| 1.50 | 73.6312 | 0.012 953 28 | 92.3630 | 0.011 565 43 | 106.0290 | 0.010 794 40 |
| 1.55 | 76.0856 | 0.013 816 90 | 95 4418 | 0.012 336 52 | 109.5633 | 0.011 514 08 |
| 1.60 | 78.5400 | 0.014 708 37 | 98.5206 | 0.013 132 48 | 113.0976 | 0.012 256 98 |
| 1.65 | 80.9944 | 0.015 627 71 | 101.5993 | 0.013 953 32 | 116.6319 | 0.013 023 10 |
| 1.70 | 83.4487 | 0.016 574 91 | 104.6781 | 0.014 799 03 | 120.1662 | 0.013 812 43 |
| 1.75 | 85.9031 | 0.017 549 97 | 107.7569 | 0.015 669 62 | 123.7005 | 0.014 624 98 |
| 1.80 | 88.3575 | 0.018 552 89 | 110.8356 | 0.016 565 09 | 127.2348 | 0.015 460 75 |
| 1.85 | 90.8118 | 0.019 583 67 | 113.9144 | 0.017 485 43 | 130.7691 | 0 016 319 73 |
| 1.90 | 93.2662 | 0.020 642 32 | 116.9932 | 0.018 430 64 | 134.3034 | 0.017 201 93 |
| 1.95 | 95.7206 | 0.021 728 82 | 120.0719 | 0.019 400 73 | 137.8377 | 0.018 107 35 |
| 2.00 | 98.1750 | 0.022 843 18 | 123.1507 | 0.020 395 70 | 141.3720 | 0.019 035 99 |
| 2.05 | 100.6293 | 0.023 985 40 | 126.2295 | 0.021 415 54 | 144.9063 | 0.019 987 84 |
| 2.10 | 103.0837 | 0.025 155 49 | 129.3083 | 0.022 460 26 | 148.4406 | 0.020 962 91 |
| 2.15 | 105.5381 | 0.026 353 44 | 132.3870 | 0.023 529 85 | 151.9749 | 0.021 961 20 |
| 2.20 | 107.9924 | 0.027 579 24 | 135.4658 | 0.024 624 33 | 155.5092 | 0.022 982 71 |
| 2.25 | 110.4468 | 0.028 832 91 | 138.5446 | 0.025 743 67 | 159.0435 | 0.024 027 43 |
| 2.30 | 112.9012 | 0.030 114 44 | 141.6233 | 0.026 887 89 | 162.5778 | 0.025 095 37 |
| 2.35 | 115.3555 | 0.031 423 82 | 144.7021 | 0.028 056 99 | 166.1121 | 0.026 186 52 |
| 2.40 | 117.8099 | 0.032 761 08 | 147.7809 | 0.029 250 96 | 169.6464 | 0.027 300 90 |
| 2.45 | 120.2643 | 0.034 126 18 | 150.8596 | 0.030 469 81 | 173.1807 | 0.028 438 49 |
| 2.50 | 122.7187 | 0.035 519 16 | 153.9384 | 0.031 713 54 | 176.7150 | 0.029 599 30 |
| 2.55 | 125.1731 | 0.036 939 99 | 157.0172 | 0.032 982 14 | 180.2493 | 0.030 783 33 |
| 2.60 | 127.6274 | 0.038 388 68 | 160.0959 | 0.034 275 61 | 183.7836 | 0.031 990 57 |
| 2.65 | 130.0818 | 0.039 865 23 | 163.1747 | 0.035 593 96 | 187.3179 | 0.033 221 03 |
| 2.70 | 132.5362 | 0.041 369 65 | 166.2535 | 0.036 937 19 | 190.8522 | 0.034 474 71 |
| 2.75 | 134.9906 | 0.042 901 92 | 169.3322 | 0.038 305 29 | 194.3865 | 0.035 751 60 |
| 2.80 | 137.4450 | 0.044 462 06 | 172.4110 | 0.039 698 27 | 197.9208 | 0.037 051 72 |
| 2.85 | 139.8993 | 0.046 050 05 | 175.4898 | 0.041 116 12 | 201.4551 | 0.038 375 05 |
| 2.90 | 142.3537 | 0.047 665 91 | 178.5685 | 0.042 558 85 | 204.9894 | 0.039 721 60 |
| 2.95 | 144.8081 | 0.049 309 63 | 181.6473 | 0.044 026 46 | 208.5237 | 0.041 091 36 |
| 3.00 | 147.2625 | 0.050 981 21 | 184.7261 | 0.045 518 94 | 212.0580 | 0.042 484 34 |

| VITESSES moyennes. | Diamèt. de la conduite 0m.32 Section *id.* 0mc.08042496 | | Diamèt. de la conduite 0m.35 Section *id.* 0mc.0962115 | | Diamèt. de la conduite 0m.38 Section *id.* 0mc.11341 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. |
| m. | l. | m. | l. | m. | l. | m. |
| 0.01 | 0.8042 | 0.000 002 61 | 0.9621 | 0.000 002 38 | 1.1341 | 0.000 002 19 |
| 0.02 | 1.6085 | 0.000 006 08 | 1.9242 | 0.000 005 55 | 2.2682 | 0.000 005 12 |
| 0.03 | 2.4127 | 0.000 010 42 | 2.8863 | 0.000 009 53 | 3.4023 | 0.000 008 77 |
| 0.04 | 3.2170 | 0.000 015 64 | 3.8485 | 0.000 014 29 | 4.5364 | 0.000 013 16 |
| 0.05 | 4.0212 | 0.000 021 72 | 4.8106 | 0.000 019 85 | 5.6705 | 0.000 018 29 |
| 0.06 | 4.8255 | 0.000 028 67 | 5.7727 | 0.000 026 21 | 6.8046 | 0.000 024 14 |
| 0.07 | 5.6297 | 0.000 036 50 | 6.7348 | 0.000 033 37 | 7.9387 | 0.000 030 73 |
| 0.08 | 6.4340 | 0.000 045 19 | 7.6969 | 0.000 041 32 | 9.0728 | 0.000 038 06 |
| 0.09 | 7.2382 | 0.000 054 76 | 8.6590 | 0.000 050 07 | 10.2069 | 0.000 046 11 |
| 0.10 | 8.0425 | 0.000 065 20 | 9.6211 | 0.000 059 61 | 11.3410 | 0.000 054 90 |
| 0.11 | 8.8467 | 0.000 076 51 | 10.5833 | 0.000 069 95 | 12.4751 | 0.000 064 43 |
| 0.12 | 9.6510 | 0.000 088 69 | 11.5454 | 0.000 081 08 | 13.6092 | 0.000 074 68 |
| 0.13 | 10.4552 | 0.000 101 74 | 12.5075 | 0.000 093 01 | 14.7433 | 0.000 085 67 |
| 0.14 | 11.2595 | 0.000 115 66 | 13.4696 | 0.000 105 74 | 15.8774 | 0.000 097 39 |
| 0.15 | 12.0637 | 0.000 130 45 | 14.4317 | 0.000 119 26 | 17.0115 | 0.000 109 85 |
| 0.16 | 12.8680 | 0.000 146 11 | 15.3938 | 0.000 133 58 | 18.1456 | 0.000 123 04 |
| 0.17 | 13.6722 | 0.000 162 64 | 16.3560 | 0.000 148 70 | 19.2797 | 0.000 136 96 |
| 0.18 | 14.4765 | 0.000 180 04 | 17.3181 | 0.000 164 61 | 20.4138 | 0.000 151 61 |
| 0.19 | 15.2807 | 0.000 198 32 | 18.2802 | 0.000 181 31 | 21.5479 | 0.000 167 00 |
| 0.20 | 16.0850 | 0.000 217 46 | 19.2423 | 0.000 198 82 | 22.6820 | 0.000 183 13 |
| 0.22 | 17.6935 | 0.000 258 36 | 21.1665 | 0.000 236 21 | 24.9502 | 0.000 217 57 |
| 0.25 | 20.1062 | 0.000 326 24 | 24.0529 | 0.000 298 27 | 28.3525 | 0.000 274 73 |
| 0.28 | 22.5190 | 0.000 401 96 | 26.9392 | 0.000 367 50 | 31.7548 | 0.000 338 49 |
| 0.30 | 24.1275 | 0.000 456 79 | 28.8634 | 0.000 417 63 | 34.0230 | 0.000 384 66 |
| 0.32 | 25.7360 | 0.000 515 10 | 30.7877 | 0.000 470 95 | 36.2912 | 0.000 433 77 |
| 0.35 | 28.1487 | 0.000 609 10 | 33.6740 | 0.000 556 89 | 39.6935 | 0.000 512 92 |
| 0.38 | 30.5615 | 0.000 710 94 | 36.5604 | 0.000 649 99 | 43.0958 | 0.000 598 68 |
| 0.40 | 32.1700 | 0.000 783 18 | 38.4846 | 0.000 716 05 | 45.3640 | 0.000 659 52 |
| 0.42 | 33.7785 | 0.000 858 90 | 40.4088 | 0.000 785 28 | 47.6322 | 0.000 723 28 |
| 0.45 | 36.1912 | 0.000 979 02 | 43.2952 | 0.000 895 10 | 51.0345 | 0.000 824 44 |
| 0.48 | 38.6040 | 0.001 106 98 | 46.1815 | 0.001 012 09 | 54.4368 | 0.000 932 19 |
| 0.50 | 40.2125 | 0.001 196 64 | 48.1057 | 0.001 094 06 | 56.7050 | 0.001 007 69 |
| 0.55 | 44.2337 | 0.001 436 01 | 52.9163 | 0.001 312 92 | 62.3755 | 0.001 209 27 |
| 0.60 | 48.2550 | 0.001 697 15 | 57.7269 | 0.001 551 68 | 68.0460 | 0.001 429 18 |
| 0.65 | 52.2762 | 0.001 980 06 | 62.5375 | 0.001 810 34 | 73.7165 | 0.001 667 42 |
| 0.70 | 56.2975 | 0.002 284 74 | 67.3480 | 0.002 088 90 | 79.3870 | 0.001 923 99 |
| 0.75 | 60.3187 | 0.002 611 18 | 72.1586 | 0.002 387 36 | 85.0575 | 0.002 198 89 |
| 0.80 | 64.3400 | 0.002 959 39 | 76.9692 | 0.002 705 73 | 90.7280 | 0.002 492 12 |
| 0.85 | 68.3612 | 0.003 329 36 | 81.7798 | 0.003 043 99 | 96.3985 | 0.002 803 67 |
| 0.90 | 72.3825 | 0.003 721 10 | 86.5903 | 0.003 402 15 | 102.0690 | 0.003 133 55 |
| 0.95 | 76.4037 | 0.004 134 61 | 91.4009 | 0.003 780 21 | 107.7395 | 0.003 481 77 |

| VITESSES moyennes. | Diamèt. de la conduite 0m.32 Section *id.* 0mc.08042496 | | Diamèt. de la conduite 0m.35 Section *id.* 0mc.0962115 | | Diamèt. de la conduite 0m.38 Section *id.* 0mc.11341 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. |
| m. | l. | m. | l. | m. | l. | m. |
| 1.00 | 80.4250 | 0.004 569 89 | 96.2115 | 0.004 178 18 | 113.4100 | 0.003 848 32 |
| 1.05 | 84.4462 | 0.005 026 92 | 101.0221 | 0.004 596 04 | 119.0805 | 0.004 233 19 |
| 1.10 | 88.4675 | 0.005 505 73 | 105.8326 | 0.005 033 81 | 124.7510 | 0.004 636 40 |
| 1.15 | 92.4887 | 0.006 006 30 | 110.6432 | 0.005 491 47 | 130.4215 | 0.005 057 93 |
| 1.20 | 96.5100 | 0.006 528 64 | 115.4538 | 0.005 969 04 | 136.0920 | 0.005 497 80 |
| 1.25 | 100.5312 | 0.007 072 74 | 120.2644 | 0.006 466 50 | 141.7625 | 0.005 955 99 |
| 1.30 | 104.5524 | 0.007 638 61 | 125.0749 | 0.006 983 87 | 147.4330 | 0.006 432 51 |
| 1.35 | 108.5737 | 0.008 226 25 | 129.8855 | 0.007 521 14 | 153.1035 | 0.006 927 36 |
| 1.40 | 112.5949 | 0.008 835 65 | 134.6961 | 0.008 078 30 | 158.7740 | 0.007 440 54 |
| 1.45 | 116.6162 | 0.009 466 82 | 139.5067 | 0.008 655 37 | 164.4445 | 0.007 972 05 |
| 1.50 | 120.6374 | 0.010 119 75 | 144.3172 | 0.009 252 34 | 170.1150 | 0.008 521 89 |
| 1.55 | 124.6587 | 0.010 794 45 | 149.1278 | 0.009 869 21 | 175.7855 | 0.009 090 06 |
| 1.60 | 128.6799 | 0.011 490 92 | 153.9384 | 0.010 505 98 | 181.4560 | 0.009 676 56 |
| 1.65 | 132.7012 | 0.012 209 15 | 158.7490 | 0.011 162 65 | 187.1265 | 0.010 281 39 |
| 1.70 | 136.7224 | 0.012 949 15 | 163.5595 | 0.011 839 22 | 192.7970 | 0.010 904 55 |
| 1.75 | 140.7437 | 0.013 710 92 | 168.3701 | 0.012 535 69 | 198.4675 | 0.011 546 03 |
| 1.80 | 144.7649 | 0.014 494 45 | 173.1807 | 0.013 252 07 | 204.1380 | 0.012 205 85 |
| 1.85 | 148.7862 | 0.015 299 75 | 177.9913 | 0.013 988 34 | 209.8085 | 0.012 884 00 |
| 1.90 | 152.8074 | 0.016 126 81 | 182.8018 | 0.014 744 51 | 215.4790 | 0.013 580 47 |
| 1.95 | 156.8287 | 0.016 975 64 | 187.6124 | 0.015 520 58 | 221.1495 | 0.014 295 27 |
| 2.00 | 160.8499 | 0.017 846 24 | 192.4230 | 0.016 316 56 | 226.8200 | 0.015 028 41 |
| 2.05 | 164.8712 | 0.018 738 70 | 197.2336 | 0.017 132 43 | 232.4905 | 0.015 779 87 |
| 2.10 | 168.8924 | 0.019 652 73 | 202.0441 | 0.017 968 21 | 238.1610 | 0.016 549 67 |
| 2.15 | 172.9137 | 0.020 588 63 | 206.8547 | 0.018 823 88 | 243.8315 | 0.017 337 79 |
| 2.20 | 176.9349 | 0.021 546 29 | 211.6653 | 0.019 699 46 | 249.5020 | 0.018 144 24 |
| 2.25 | 180.9562 | 0.022 525 71 | 216.4759 | 0.020 594 93 | 255.1725 | 0.018 969 02 |
| 2.30 | 184.9774 | 0.023 526 90 | 221.2864 | 0.021 510 31 | 260.8430 | 0.019 812 13 |
| 2.35 | 188.9987 | 0.024 549 87 | 226.0970 | 0.022 445 59 | 266.5135 | 0.020 673 57 |
| 2.40 | 193.0199 | 0.025 594 59 | 230.9076 | 0.023 400 77 | 272.1840 | 0.021 553 34 |
| 2.45 | 197.0412 | 0.026 661 09 | 235.7182 | 0.024 375 85 | 277.8545 | 0.022 451 44 |
| 2.50 | 201.0624 | 0.027 749 34 | 240.5287 | 0.025 370 83 | 283.5250 | 0.023 367 86 |
| 2.55 | 205.0836 | 0.028 859 37 | 245.3393 | 0.026 385 71 | 289.1955 | 0.024 302 62 |
| 2.60 | 209.1048 | 0.029 991 16 | 250.1499 | 0.027 420 49 | 294.8660 | 0.025 255 71 |
| 2.65 | 213.1261 | 0.031 144 72 | 254.9604 | 0.028 475 17 | 300.5365 | 0.026 227 13 |
| 2.70 | 217.1474 | 0.032 320 04 | 259.7710 | 0.029 549 75 | 306.2070 | 0.027 216 87 |
| 2.75 | 221.1686 | 0.033 517 13 | 264.5816 | 0.030 644 23 | 311.8775 | 0.028 224 95 |
| 2.80 | 225.1899 | 0.034 735 99 | 269.3922 | 0.031 758 61 | 317.5480 | 0.029 251 35 |
| 2.85 | 229.2111 | 0.035 976 61 | 274.2027 | 0.032 892 89 | 323.2185 | 0.030 296 09 |
| 2.90 | 233.2324 | 0.037 239 00 | 279.0133 | 0.034 047 08 | 328.8890 | 0.031 359 15 |
| 2.95 | 237.2536 | 0.038 523 15 | 283.8239 | 0.035 221 16 | 334.5595 | 0.032 440 54 |
| 3.00 | 241.2749 | 0.039 829 07 | 288.6345 | 0.036 415 15 | 340.2300 | 0.033 540 27 |

| VITESSES moyennes. | Diamèt. de la conduite 0m.40 Section *id.* 0mc.125664 | | Diamèt. de la conduite 0m.42 Section *id.* 0mc.13854456 | | Diamèt. de la conduite 0m.45 Section *id.* 0mc.1590435 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. |
| m. | l. | m. | l. | m. | l. | m. |
| 0.01 | 1.2566 | 0.000 002 09 | 1.3854 | 0.000 001 98 | 1.5904 | 0.000 001 85 |
| 0.02 | 2.5133 | 0.000 004 86 | 2.7709 | 0.000 004 63 | 3.1809 | 0.000 004 32 |
| 0.03 | 3.7699 | 0.000 008 34 | 4.1563 | 0.000 007 94 | 4.7713 | 0.000 007 41 |
| 0.04 | 5.0266 | 0.000 012 51 | 5.5418 | 0.000 011 91 | 6.3617 | 0.000 011 12 |
| 0.05 | 6.2832 | 0.000 017 38 | 6.9272 | 0.000 016 55 | 7.9522 | 0.000 015 44 |
| 0.06 | 7.5398 | 0.000 022 94 | 8.3127 | 0.000 021 84 | 9.5426 | 0.000 020 39 |
| 0.07 | 8.7965 | 0.000 029 20 | 9.6981 | 0.000 027 81 | 11.1330 | 0.000 025 95 |
| 0.08 | 10.0531 | 0.000 036 16 | 11.0836 | 0.000 034 43 | 12.7235 | 0.000 032 14 |
| 0.09 | 11.3098 | 0.000 043 81 | 12.4690 | 0.000 041 72 | 14.3139 | 0.000 038 94 |
| 0.10 | 12.5664 | 0.000 052 16 | 13.8545 | 0.000 049 67 | 15.9043 | 0.000 046 36 |
| 0.11 | 13.8230 | 0.000 061 21 | 15.2399 | 0.000 058 29 | 17.4948 | 0.000 054 40 |
| 0.12 | 15.0797 | 0.000 070 95 | 16.6253 | 0.000 067 57 | 19.0852 | 0.000 063 06 |
| 0.13 | 16.3363 | 0.000 081 39 | 18.0108 | 0.000 077 51 | 20.6757 | 0.000 072 34 |
| 0.14 | 17.5930 | 0.000 092 53 | 19.3962 | 0.000 088 12 | 22.2661 | 0.000 082 24 |
| 0.15 | 18.8496 | 0.000 104 36 | 20.7817 | 0.000 099 39 | 23.8565 | 0.000 092 76 |
| 0.16 | 20.1062 | 0.000 116 89 | 22.1671 | 0.000 111 32 | 25.4470 | 0.000 103 90 |
| 0.17 | 21.3629 | 0.000 130 11 | 23.5526 | 0.000 123 92 | 27.0374 | 0.000 115 65 |
| 0.18 | 22.6195 | 0.000 144 04 | 24.9380 | 0.000 137 17 | 28.6278 | 0.000 128 03 |
| 0.19 | 23.8762 | 0.000 158 65 | 26.3235 | 0.000 151 09 | 30.2183 | 0.000 141 02 |
| 0.20 | 25.1328 | 0.000 173 97 | 27.7089 | 0.000 165 72 | 31.8087 | 0.000 154 64 |
| 0.22 | 27.6461 | 0.000 206 69 | 30.4798 | 0.000 196 85 | 34.9896 | 0.000 183 72 |
| 0.25 | 31.4160 | 0.000 260 99 | 34.6361 | 0.000 248 56 | 39.7609 | 0.000 231 99 |
| 0.28 | 35.1859 | 0.000 321 57 | 38.7925 | 0.000 306 25 | 44.5322 | 0.000 285 83 |
| 0.30 | 37.6992 | 0.000 365 43 | 41.5634 | 0.000 348 03 | 47.7130 | 0.000 324 82 |
| 0.32 | 40.2125 | 0.000 412 08 | 44.3343 | 0.000 392 46 | 50.8939 | 0.000 366 29 |
| 0.35 | 43.9824 | 0.000 487 28 | 48.4906 | 0.000 464 07 | 55.6652 | 0.000 433 14 |
| 0.38 | 47.7523 | 0.000 568 75 | 52.6469 | 0.000 541 66 | 60.4365 | 0.000 505 55 |
| 0.40 | 50.2656 | 0.000 626 54 | 55.4178 | 0.000 596 71 | 63.6174 | 0.000 556 92 |
| 0.42 | 52.7789 | 0.000 687 12 | 58.1887 | 0.000 654 40 | 66.7983 | 0.000 610 77 |
| 0.45 | 56.5488 | 0.000 783 22 | 62.3451 | 0.000 745 92 | 71.5696 | 0.000 696 19 |
| 0.48 | 60.3187 | 0.000 885 58 | 66.5014 | 0.000 843 41 | 76.3409 | 0.000 787 18 |
| 0.50 | 62.8320 | 0.000 957 31 | 69.2723 | 0.000 911 72 | 79.5217 | 0.000 850 94 |
| 0.55 | 69.1152 | 0.001 148 81 | 76.1995 | 0.001 094 10 | 87.4739 | 0.001 021 16 |
| 0.60 | 75.3984 | 0.001 357 72 | 83.1267 | 0.001 293 07 | 95.4261 | 0.001 206 86 |
| 0.65 | 81.6816 | 0.001 584 05 | 90.0540 | 0.001 508 62 | 103.3783 | 0.001 408 04 |
| 0.70 | 87.9648 | 0.001 827 79 | 96.9812 | 0.001 740 75 | 111.3304 | 0.001 624 70 |
| 0.75 | 94.2480 | 0.002 088 95 | 103.9084 | 0.001 989 47 | 119.2826 | 0.001 856 84 |
| 0.80 | 100.5312 | 0.002 367 51 | 110.8356 | 0.002 254 77 | 127.2348 | 0.002 104 45 |
| 0.85 | 106.8144 | 0.002 663 49 | 117.7629 | 0.002 536 66 | 135.1870 | 0.002 367 54 |
| 0.90 | 113.0976 | 0.002 976 88 | 124.6901 | 0.002 835 12 | 143.1391 | 0.002 646 12 |
| 0.95 | 110.3808 | 0.003 307 69 | 131.6173 | 0.003 150 18 | 151.0913 | 0.002 940 16 |

| VITESSES moyennes. | Diamèt. de la conduite 0m.40 Section *id.* 0mc.125664 | | Diamèt. de la conduite 0m.42 Section *id.* 0mc.13854456 | | Diamèt. de la conduite 0m.45 Section *id.* 0mc.1590435 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. |
| m. | l. | m. | l. | m. | l. | m. |
| 1.00 | 125.6640 | 0.003 635 91 | 138.5446 | 0.003 481 82 | 159.0435 | 0.003 249 69 |
| 1.05 | 131.9472 | 0.004 021 54 | 145.4718 | 0.003 830 03 | 166.9957 | 0.003 574 70 |
| 1.10 | 138.2304 | 0.004 404 58 | 152.3990 | 0.004 194 84 | 174.9478 | 0.003 915 18 |
| 1.15 | 144.5136 | 0.004 805 04 | 159.3262 | 0.004 576 23 | 182.9000 | 0.004 271 14 |
| 1.20 | 150.7968 | 0.005 222 91 | 166.2535 | 0.004 974 20 | 190.8522 | 0.004 642 58 |
| 1.25 | 157.0800 | 0.005 658 19 | 173.1807 | 0.005 388 75 | 198.8044 | 0.005 029 50 |
| 1.30 | 163.3632 | 0.006 110 88 | 180.1079 | 0.005 819 89 | 206.7565 | 0.005 431 90 |
| 1.35 | 169.6464 | 0.006 581 00 | 187.0352 | 0.006 267 62 | 214.7087 | 0.005 849 77 |
| 1.40 | 175.9296 | 0.007 068 52 | 193.9624 | 0.006 731 92 | 222.6609 | 0.006 283 12 |
| 1.45 | 182.2128 | 0.007 573 45 | 200.8896 | 0.007 212 81 | 230.6131 | 0.006 731 96 |
| 1.50 | 188.4960 | 0.008 095 80 | 207.8168 | 0.007 710 28 | 238.5652 | 0.007 196 26 |
| 1.55 | 194.7792 | 0.008 635 56 | 214.7441 | 0.008 224 34 | 246.5174 | 0.007 676 05 |
| 1.60 | 201.0624 | 0.009 192 74 | 221.6713 | 0.008 754 98 | 254.4696 | 0.008 171 32 |
| 1.65 | 207.3456 | 0.009 767 32 | 228.5985 | 0.009 302 21 | 262.4218 | 0.008 682 06 |
| 1.70 | 213.6288 | 0.010 359 32 | 235.5258 | 0.009 866 02 | 270.3739 | 0.009 208 28 |
| 1.75 | 219.9120 | 0.010 968 74 | 242.4530 | 0.010 446 41 | 278.3261 | 0.009 749 98 |
| 1.80 | 226.1952 | 0.011 595 56 | 249.3802 | 0.011 043 39 | 286.2783 | 0.010 307 16 |
| 1.85 | 232.4784 | 0.012 239 80 | 256.3074 | 0.011 656 95 | 294.2305 | 0.010 879 82 |
| 1.90 | 238.7616 | 0.012 901 45 | 263.2347 | 0.012 287 09 | 302.1826 | 0.011 467 95 |
| 1.95 | 245.0448 | 0.013 580 51 | 270.1619 | 0.012 933 82 | 310.1348 | 0.012 071 56 |
| 2.00 | 251.3280 | 0.014 276 99 | 277.0891 | 0.013 597 13 | 318.0870 | 0.012 690 66 |
| 2.05 | 257.6112 | 0.014 990 88 | 284.0164 | 0.014 277 03 | 326.0392 | 0.013 325 22 |
| 2.10 | 263.8944 | 0.015 722 19 | 290.9436 | 0.014 973 51 | 333.9913 | 0.013 975 27 |
| 2.15 | 269.1776 | 0.016 470 90 | 297.8708 | 0.015 686 57 | 341.9435 | 0.014 640 80 |
| 2.20 | 276.4608 | 0.017 237 03 | 304.7980 | 0.016 416 22 | 349.8957 | 0.015 321 80 |
| 2.25 | 282.7440 | 0.018 020 57 | 311.7253 | 0.017 162 45 | 357.8479 | 0.016 018 28 |
| 2.30 | 289.0272 | 0.018 821 53 | 318.6525 | 0.017 925 26 | 365.8000 | 0.016 730 24 |
| 2.35 | 295.3104 | 0.019 639 89 | 325.5797 | 0.018 704 66 | 373.7522 | 0.017 457 68 |
| 2.40 | 301.5936 | 0.020 475 68 | 332.5069 | 0.019 500 64 | 381.5044 | 0.018 200 60 |
| 2.45 | 307.8768 | 0.021 328 87 | 339.4342 | 0.020 313 21 | 389.6566 | 0.018 958 99 |
| 2.50 | 314.1600 | 0.022 199 48 | 346.3614 | 0.021 142 36 | 397.6087 | 0.019 732 86 |
| 2.55 | 320.4432 | 0.023 087 50 | 353.2886 | 0.021 988 09 | 405.5609 | 0.020 522 22 |
| 2.60 | 326.7264 | 0.023 992 93 | 360.2159 | 0.022 850 41 | 413.5131 | 0.021 327 04 |
| 2.65 | 333.0096 | 0.024 915 77 | 367.1431 | 0.023 729 31 | 421.4652 | 0.022 147 35 |
| 2.70 | 339.2928 | 0.025 856 03 | 374.0703 | 0.024 624 79 | 429.4174 | 0.022 983 14 |
| 2.75 | 345.5760 | 0.026 813 70 | 380.9975 | 0.025 536 86 | 437.3696 | 0.023 834 40 |
| 2.80 | 351.8592 | 0.027 788 79 | 387.9248 | 0.026 465 51 | 445.3218 | 0.024 701 14 |
| 2.85 | 358.1424 | 0.028 781 29 | 394.8520 | 0.027 410 75 | 453.2739 | 0.025 583 36 |
| 2.90 | 364.4256 | 0.029 791 20 | 401.7792 | 0.028 372 57 | 461.2261 | 0.026 481 06 |
| 2.95 | 370.7088 | 0.030 818 52 | 408.7064 | 0.029 350 97 | 469.1783 | 0.027 394 24 |
| 3.00 | 376.9920 | 0.031 863 26 | 415.6337 | 0.030 345 96 | 477.1305 | 0.028 322 89 |

| VITESSES moyennes. | Diamèt. de la conduite 0m.48 Section *id.* 0mc.18095616 | | Diamèt. de la conduite 0m.50 Section *id.* 0mc.19635 | | Diamèt. de la conduite 0m.55 Section *id.* 0mc.2375835 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. |
| m. | l. | m. | l. | m. | l. | m. |
| 0.01 | 1.8096 | 0.000 001 74 | 1.9635 | 0.000 001 67 | 2.3758 | 0.000 001 51 |
| 0.02 | 3.6191 | 0.000 004 05 | 3.9270 | 0.000 003 89 | 4.7517 | 0.000 003 54 |
| 0.03 | 5.4287 | 0.000 006 95 | 5.8905 | 0.000 006 67 | 7.1275 | 0.000 006 06 |
| 0.04 | 7.2382 | 0.000 010 43 | 7.8540 | 0.000 010 01 | 9.5033 | 0.000 009 09 |
| 0.05 | 9.0478 | 0.000 014 48 | 9.8175 | 0.000 013 90 | 11.8792 | 0.000 012 63 |
| 0.06 | 10.8574 | 0.000 019 12 | 11.7810 | 0.000 018 35 | 14.2550 | 0.000 016 68 |
| 0.07 | 12.6669 | 0.000 024 34 | 13.7445 | 0.000 023 36 | 16.6308 | 0.000 021 23 |
| 0.08 | 14.4765 | 0.000 030 13 | 15.7080 | 0.000 028 92 | 19.0067 | 0.000 026 29 |
| 0.09 | 16.2861 | 0.000 036 51 | 17.6715 | 0.000 035 05 | 21.3825 | 0.000 031 86 |
| 0.10 | 18.0956 | 0.000 043 47 | 19.6350 | 0.000 041 73 | 23.7583 | 0.000 037 93 |
| 0.11 | 19.9052 | 0.000 051 01 | 21.5985 | 0.000 048 97 | 26.1342 | 0.000 044 51 |
| 0.12 | 21.7147 | 0.000 059 13 | 23.5620 | 0.000 056 76 | 28.5100 | 0.000 051 60 |
| 0.13 | 23.5243 | 0.000 067 83 | 25.5255 | 0.000 065 11 | 30.8859 | 0.000 059 19 |
| 0.14 | 25.3339 | 0.000 077 11 | 27.4890 | 0.000 074 02 | 33.2617 | 0.000 067 29 |
| 0.15 | 27.1434 | 0.000 086 97 | 29.4525 | 0.000 083 49 | 35.6375 | 0.000 075 89 |
| 0.16 | 28.9530 | 0.000 097 41 | 31.4160 | 0.000 093 51 | 38.0134 | 0.000 085 01 |
| 0.17 | 30.7625 | 0.000 108 43 | 33.3795 | 0.000 104 09 | 40.3892 | 0.000 094 63 |
| 0.18 | 32.5721 | 0.000 120 03 | 35.3430 | 0.000 115 23 | 42.7650 | 0.000 104 75 |
| 0.19 | 34.3817 | 0.000 132 21 | 37.3065 | 0.000 126 92 | 45.1409 | 0.000 115 38 |
| 0.20 | 36.1912 | 0.000 144 98 | 39.2700 | 0.000 139 17 | 47.5167 | 0.000 126 52 |
| 0.22 | 39.8104 | 0.000 172 24 | 43.1970 | 0.000 165 35 | 52.2684 | 0.000 150 32 |
| 0.25 | 45.2390 | 0.000 217 50 | 49.0875 | 0.000 208 79 | 59.3959 | 0.000 189 81 |
| 0.28 | 50.6677 | 0.000 267 97 | 54.9780 | 0.000 257 25 | 66.5234 | 0.000 233 86 |
| 0.30 | 54.2868 | 0.000 304 53 | 58.9050 | 0.000 292 34 | 71.2750 | 0.000 265 77 |
| 0.32 | 57.9060 | 0.000 343 40 | 62.8320 | 0.000 329 66 | 76.0267 | 0.000 299 69 |
| 0.35 | 63.3347 | 0.000 406 07 | 68.7225 | 0.000 389 82 | 83.1542 | 0.000 354 38 |
| 0.38 | 68.7633 | 0.000 473 96 | 74.6130 | 0.000 455 00 | 90.2817 | 0.000 413 63 |
| 0.40 | 72.3825 | 0.000 522 12 | 78.5400 | 0.000 501 23 | 95.0334 | 0.000 455 67 |
| 0.42 | 76.0016 | 0.000 572 60 | 82.4670 | 0.000 549 70 | 99.7851 | 0.000 499 72 |
| 0.45 | 81.4303 | 0.000 652 68 | 88.3575 | 0.000 626 57 | 106.9126 | 0.000 569 61 |
| 0.48 | 86.8590 | 0.000 737 99 | 94.2480 | 0.000 708 47 | 114.0401 | 0.000 644 06 |
| 0.50 | 90.4781 | 0.000 797 76 | 98.1750 | 0.000 765 84 | 118.7917 | 0.000 696 22 |
| 0.55 | 99.5259 | 0.000 957 34 | 107.9925 | 0.000 919 04 | 130.6709 | 0.000 835 49 |
| 0.60 | 108.5737 | 0.001 131 44 | 117.8100 | 0.001 086 18 | 142.5501 | 0.000 987 43 |
| 0.65 | 117.6215 | 0.001 320 04 | 127.6275 | 0.001 267 24 | 154.4293 | 0.001 152 03 |
| 0.70 | 126.6693 | 0.001 523 16 | 137.4450 | 0.001 462 23 | 166.3084 | 0.001 329 30 |
| 0.75 | 135.7171 | 0.001 740 79 | 147.2625 | 0.001 671 15 | 178.1876 | 0.001 519 23 |
| 0.80 | 144.7649 | 0.001 972 93 | 157.0800 | 0.001 894 01 | 190.0668 | 0.001 721 83 |
| 0.85 | 153.8127 | 0.002 219 58 | 166.8975 | 0.002 130 79 | 201.9460 | 0.001 937 08 |
| 0.90 | 162.8605 | 0.002 480 74 | 176.7150 | 0.002 381 50 | 213.8251 | 0.002 165 00 |
| 0.95 | 171.9084 | 0.002 756 41 | 186.5325 | 0.002 646 15 | 225.7043 | 0.002 405 59 |

| VITESSES moyennes. | Diamèt. de la conduite 0m.48 Section *id.* 0mc.18095616 | | Diamèt. de la conduite 0m.50 Section *id.* 0mc.19635 | | Diamèt. de la conduite 0m.55 Section *id.* 0mc.2375835 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. |
| m. | l. | m. | l. | m. | l. | m. |
| 1.00 | 180.9562 | 0.003 046 59 | 196.3500 | 0.002 924 72 | 237.5835 | 0.002 658 84 |
| 1.05 | 190.0040 | 0.003 351 28 | 206.1675 | 0.003 217 23 | 249.4627 | 0.002 924 75 |
| 1.10 | 199.0518 | 0.003 670 49 | 215.9850 | 0.003 523 66 | 261.3418 | 0.003 203 33 |
| 1.15 | 208.0996 | 0.004 004 20 | 225.8025 | 0.003 844 03 | 273.2210 | 0.003 494 57 |
| 1.20 | 217.1474 | 0.004 352 43 | 235.6200 | 0.004 178 33 | 285.1002 | 0.003 798 48 |
| 1.25 | 226.1952 | 0.004 715 16 | 245.4375 | 0.004 526 55 | 296.9794 | 0.004 115 05 |
| 1.30 | 235.2430 | 0.005 092 41 | 255.2550 | 0.004 888 71 | 308.8585 | 0.004 444 28 |
| 1.35 | 244.2908 | 0.005 484 17 | 265.0725 | 0.005 264 80 | 320.7377 | 0.004 786 18 |
| 1.40 | 253.3386 | 0.005 890 43 | 274.8900 | 0.005 654 81 | 332.6169 | 0.005 140 74 |
| 1.45 | 262.3864 | 0.006 311 21 | 284.7075 | 0.006 058 76 | 344.4961 | 0.005 507 96 |
| 1.50 | 271.4342 | 0.006 746 50 | 294.5250 | 0.006 476 64 | 356.3752 | 0.005 887 85 |
| 1.55 | 280.4820 | 0.007 196 30 | 304.3425 | 0.006 908 45 | 368.2544 | 0.006 280 41 |
| 1.60 | 289.5299 | 0.007 660 61 | 314.1600 | 0.007 354 19 | 380.1336 | 0.006 685 62 |
| 1.65 | 298.5777 | 0.008 139 44 | 323.9775 | 0.007 813 86 | 392.0128 | 0.007 103 51 |
| 1.70 | 307.6255 | 0.008 632 77 | 333.7950 | 0.008 287 46 | 403.8919 | 0.007 534 05 |
| 1.75 | 316.6733 | 0.009 140 61 | 343.6125 | 0.008 774 99 | 415.7711 | 0.007 977 26 |
| 1.80 | 325.7211 | 0.009 662 97 | 353.4300 | 0.009 276 45 | 427.6503 | 0.008 433 13 |
| 1.85 | 334.7689 | 0.010 199 83 | 363.2475 | 0.009 791 84 | 439.5295 | 0.008 901 67 |
| 1.90 | 343.8167 | 0.010 751 21 | 373.0650 | 0.010 321 16 | 451.4086 | 0.009 382 87 |
| 1.95 | 352.8645 | 0.011 317 10 | 382.8825 | 0.010 864 41 | 463.2878 | 0.009 876 73 |
| 2.00 | 361.9123 | 0.011 897 49 | 392.7000 | 0.011 421 59 | 475.1670 | 0.010 383 26 |
| 2.05 | 370.9601 | 0.012 492 40 | 402.5175 | 0.011 992 70 | 487.0462 | 0.010 902 46 |
| 2.10 | 380.0079 | 0.013 101 82 | 412.3350 | 0.012 577 75 | 498.9253 | 0.011 434 31 |
| 2.15 | 389.0557 | 0.013 725 75 | 422.1525 | 0.013 176 72 | 510.8045 | 0.011 978 83 |
| 2.20 | 398.1036 | 0.014 364 19 | 431.9700 | 0.013 789 62 | 522.6837 | 0.012 536 02 |
| 2.25 | 407.1514 | 0.015 017 14 | 441.7875 | 0.014 416 45 | 534.5629 | 0.013 105 87 |
| 2.30 | 416.1992 | 0.015 684 61 | 451.6050 | 0.015 057 22 | 546.4420 | 0.013 688 38 |
| 2.35 | 425.2470 | 0.016 366 58 | 461.4225 | 0.015 711 91 | 558.3212 | 0.014 283 56 |
| 2.40 | 434.2948 | 0.017 063 06 | 471.2400 | 0.016 380 54 | 570.2004 | 0.014 891 40 |
| 2.45 | 443.3426 | 0.017 774 06 | 481.0575 | 0.017 063 09 | 582.0796 | 0.015 511 90 |
| 2.50 | 452.3904 | 0.018 499 56 | 490.8750 | 0.017 759 58 | 593.9587 | 0.016 145 07 |
| 2.55 | 461.4382 | 0.019 239 58 | 500.6925 | 0.018 469 99 | 605.8379 | 0.016 790 90 |
| 2.60 | 470.4860 | 0.019 994 11 | 510.5100 | 0.019 194 34 | 617.7171 | 0.017 449 40 |
| 2.65 | 479.5338 | 0.020 763 15 | 520.3275 | 0.019 932 62 | 629.5962 | 0.018 120 56 |
| 2.70 | 488.5816 | 0.021 546 70 | 530.1450 | 0.020 684 82 | 641.4754 | 0.018 804 39 |
| 2.75 | 497.6294 | 0.022 344 75 | 539.9625 | 0.021 450 96 | 653.3546 | 0.019 500 87 |
| 2.80 | 506.6772 | 0.023 157 33 | 549.7800 | 0.022 231 03 | 665.2337 | 0.020 210 03 |
| 2.85 | 515.7251 | 0.023 984 41 | 559.5975 | 0.023 025 03 | 677.1129 | 0.020 931 84 |
| 2.90 | 524.7729 | 0.024 826 00 | 569.4150 | 0.023 832 96 | 688.9921 | 0.021 666 32 |
| 2.95 | 533.8207 | 0.025 682 10 | 579.2325 | 0.024 654 81 | 700.8713 | 0.022 413 47 |
| 3.00 | 542.8685 | 0.026 552 72 | 589.0500 | 0.025 490 60 | 712.7505 | 0.023 173 28 |

| VITESSES moyennes. | Diamèt. de la conduite 0m.60 Section *id.* 0mc.282744 | | VITESSES moyennes. | Diamèt. de la conduite 0m.60 Section *id.* 0mc.282744 | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. | | Dépenses en litres par seconde. | Charges par mètre de longueur de conduite. |
| m. | l. | m. | m. | l. | m. |
| 0.01 | 2.8274 | 0.000 001 39 | 1.00 | 282.7440 | 0.002 437 27 |
| 0.02 | 5.6549 | 0.000 003 24 | 1.05 | 296.8812 | 0.002 681 02 |
| 0.03 | 8.4823 | 0.000 005 56 | 1.10 | 311.0184 | 0.002 936 39 |
| 0.04 | 11.3098 | 0.000 008 34 | 1.15 | 325.1556 | 0.003 203 36 |
| 0.05 | 14.1372 | 0.000 011 58 | 1.20 | 339.2928 | 0.003 481 94 |
| 0.06 | 16.9646 | 0.000 015 29 | 1.25 | 353.4300 | 0.003 772 13 |
| 0.07 | 19.7921 | 0.000 019 47 | 1.30 | 367.5672 | 0.004 073 92 |
| 0.08 | 22.6195 | 0.000 024 10 | 1.35 | 381.7044 | 0.004 387 33 |
| 0.09 | 25.4470 | 0.000 029 21 | 1.40 | 395.8416 | 0.004 712 34 |
| 0.10 | 28.2744 | 0.000 034 77 | 1.45 | 409.9788 | 0.005 048 97 |
| 0.11 | 31.1018 | 0.000 040 80 | 1.50 | 424.1160 | 0.005 397 20 |
| 0.12 | 33.9293 | 0.000 047 30 | 1.55 | 438.2532 | 0.005 757 04 |
| 0.13 | 36.7567 | 0.000 054 26 | 1.60 | 452.3904 | 0.006 128 49 |
| 0.14 | 39.5842 | 0.000 061 68 | 1.65 | 466.5276 | 0.006 511 55 |
| 0.15 | 42.4116 | 0.000 069 57 | 1.70 | 480.6648 | 0.006 906 21 |
| 0.16 | 45.2390 | 0.000 077 92 | 1.75 | 494.8020 | 0 007 312 49 |
| 0.17 | 48.0665 | 0.000 086 74 | 1.80 | 508.9392 | 0.007 730 37 |
| 0.18 | 50.8939 | 0.000 096 02 | 1.85 | 523.0764 | 0.008 159 86 |
| 0.19 | 53.7214 | 0.000 105 77 | 1.90 | 537.2136 | 0.008 600 97 |
| 0.20 | 56.5488 | 0.000 115 98 | 1.95 | 551.3508 | 0.009 053 67 |
| 0.22 | 62.2037 | 0.000 137 79 | 2.00 | 565.4880 | 0.009 517 99 |
| 0.25 | 70.6860 | 0.000 173 99 | 2.05 | 579.6252 | 0.009 993 92 |
| 0.28 | 79.1683 | 0.000 214 38 | 2.10 | 593.7624 | 0.010 481 46 |
| 0.30 | 84.8232 | 0.000 243 62 | 2.15 | 607.8996 | 0.010 980 60 |
| 0.32 | 90.4781 | 0.000 274 72 | 2.20 | 622.0368 | 0 011 491 35 |
| 0.35 | 98.9604 | 0.000 324 85 | 2.25 | 636.1740 | 0.012 013 71 |
| 0.38 | 107.4427 | 0.000 379 16 | 2.30 | 650.3112 | 0.012 547 68 |
| 0.40 | 113.0976 | 0.000 417 69 | 2.35 | 664.4484 | 0.013 093 26 |
| 0.42 | 118.7525 | 0.000 458 08 | 2.40 | 678.5856 | 0.013 650 45 |
| 0.45 | 127.2348 | 0.000 522 14 | 2.45 | 692.7228 | 0.014 219 24 |
| 0.48 | 135.7171 | 0.000 590 39 | 2.50 | 706.8600 | 0.014 799 65 |
| 0.50 | 141.3720 | 0.000 638 20 | 2.55 | 720.9972 | 0.015 391 66 |
| 0.55 | 155.5092 | 0.000 765 87 | 2.60 | 735.1344 | 0.016 995 28 |
| 0.60 | 169.6464 | 0.000 905 15 | 2.65 | 749.2716 | 0.016 610 51 |
| 0.65 | 183.7836 | 0.001 056 03 | 2.70 | 763.4088 | 0.017 237 35 |
| 0.70 | 197.9208 | 0.001 218 53 | 2.75 | 777.5460 | 0.017 875 80 |
| 0.75 | 212.0580 | 0.001 392 63 | 2.80 | 791.6832 | 0.018 525 86 |
| 0.80 | 226.1952 | 0.001 578 34 | 2.85 | 805.8204 | 0.019 187 52 |
| 0.85 | 240.3324 | 0.001 775 66 | 2.90 | 819.9576 | 0.019 860 80 |
| 0.90 | 254.4696 | 0.001 984 59 | 2.95 | 834.0948 | 0.020 545 68 |
| 0.95 | 268.6068 | 0.002 205 12 | 3.00 | 848.2320 | 0.021 242 17 |

La table précédente va nous servir à résoudre quelques problèmes dont la solution serait assez longue avec le secours seul de la table de Prony ou de celle de M. de Saint-Venant (165).

168. 1er Problème. *Soit* (problème déjà résolu au n° 166) *à déterminer le diamètre d'une conduite de* 5000 *mètres de longueur, capable de débiter* 60 *mètres cubes d'eau par heure, ou* 16,6667 *litres par seconde, la charge totale étant de* 5 *mètres, ce qui fait* 0m,001 *par mètre de longueur de conduite.*

On cherche, en considérant successivement les différents diamètres de la table, quel est le plus petit de ces diamètres capable de dépenser le volume 16l,6667 par seconde, ou le volume immédiatement supérieur, sans que la charge correspondante dépasse 0m,001, et ce plus petit diamètre est celui qu'il convient d'employer.

Considérant le diamètre 0m,20, on voit que la dépense 17l,2788, immédiatement supérieure à 16l,6667, correspond à une charge de 0m,002 297 61 par mètre de longueur de conduite; le diamètre 0m,20 est donc trop faible.

Pour le diamètre 0m,22, la dépense 17l,1060 correspondant à la charge 0m,001 424 03, ce diamètre n'est pas encore assez grand.

Pour le diamètre 0m,24, la dépense 17l,1908 correspondant à la charge 0m,000 947 91, ce diamètre est plus que suffisant pour produire le débit 16l,6667 sous une charge de 0m,001; mais l'excès de dépense qu'il pourra produire compensera les dépôts dont il a déjà été question (166). Puisque le diamètre 0m,24 satisfait aux conditions du problème, à plus forte raison les diamètres supérieurs devront-ils y satisfaire.

169. 2e Problème. Ce problème et ceux qui suivent ne sont autre chose que la réunion de plusieurs analogues au précédent (168), et se résolvent en suivant la même marche que pour ce premier.

*Il s'agit, au moyen d'une machine à vapeur, d'élever par heure* 60 *mètres cubes d'eau à* 25m,00 *de hauteur au-dessus du niveau du puisard des pompes; la longueur totale de la conduite, qui a un diamètre constant sur toute sa longueur, est de* 1000 *mètres; on demande quel diamètre on devra donner à la conduite, sachant qu'elle n'alimente aucun branchement sur son parcours.*

Si l'on n'avait à considérer que les frais d'établissement de la conduite, il est évident que l'on devrait adopter le plus petit diamètre capable de débiter 60 mètres cubes par heure ou 16l,6667 par seconde, sans que la vitesse moyenne dépasse 3m,00 par seconde; mais comme la charge à vaincre et par suite la force de la machine augmentent à mesure que le diamètre de la conduite diminue, il faut, pour résoudre le plus convenablement possible le problème en question, dresser un tableau des prix d'établissement des différentes conduites et des machines qui leur sont nécessaires, et faire entrer dans la comparaison de ces

prix les intérêts des sommes dépensées ainsi que les dépenses annuelles de charbon et d'entretien; il faut avoir égard aussi au renouvellement du matériel.

On doit donc se rendre compte de la force des machines pour les différents diamètres susceptibles d'être employés. Le plus petit des diamètres dont on peut faire usage est $0^m,09$, lequel, pour une dépense de $16^l,858\,6$, exige une charge de $0^m,110\,736\,76$ par mètre de longueur de conduite. La charge, à très-peu près exacte, pour le volume $16^l,666\,7$ que doit dépenser la conduite, s'obtient par une simple proportion : on remarque que pour la différence $0^l,318\,1$, des deux dépenses successives $16^l,858\,6$ et $16^l,540\,5$ de la table, la différence de charge par mètre de longueur de conduite est $0^m,110\,736\,76 - 0^m,106\,635\,22 = 0^m,004\,101\,54$, ou à peu près $0^m,004\,1$ ; alors, pour la différence $16^l,858\,6 - 16^l,666\,7 = 0^l,191\,9$, on conclura la différence de charge $x$ de la proportion

$$0,318\,1 : 0,191\,9 = 0,004\,1 : x,$$

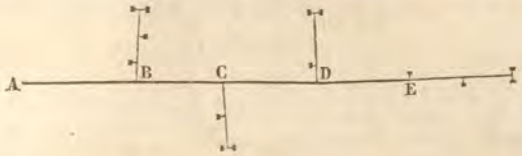
qui donne $x = 0^m,002\,473$. La charge correspondant à la dépense $16^l,666\,7$ est donc $0^m,110\,736\,76 - 0^m,002\,473 = 0^m,108\,26$ environ. Pour les 1000 mètres de longueur de conduite, la charge sera alors de $108^m,26$, auxquels il faut encore ajouter les 25 mètres d'élévation de l'eau, ce qui donne une charge totale définitive de $133^m,26$. L'effet utile de la machine, non compris le frottement des pompes, sera donc de $133,26 \times 60000 = 7995600$ kilogrammètres par heure, ce qui correspond à une force de $\frac{7995600}{270000} = 29,61$ chevaux (36).

En opérant de la même manière pour les diamètres successifs $0^m,12$, $0^m,15$, $0^m,20$, $0^m,25$, on obtient les résultats du tableau suivant :

| DIAMÈTRE de la conduite. | CHARGE TOTALE due au mouvement de l'eau et à son élévation. | EFFET UTILE de la machine en kilog. m., par heure. | FORCE de la machine en chevaux. |
|---|---|---|---|
| m | m | | |
| 0.09 | 108.26 + 25 = 133.26 | 7 995 600 | 29.61 |
| 0.12 | 26.07 + 25 = 51.07 | 3 063 960 | 11.35 |
| 0.15 | 8.70 + 25 = 33.70 | 2 022 000 | 7.49 |
| 0.20 | 2.15 + 25 = 27.15 | 1 629 000 | 6.03 |
| 0.25 | 0.74 + 25 = 25.74 | 1 544 400 | 5.72 |

**170.** 3e Problème. *Distribution d'eau au moyen d'une conduite* AE *de diamètre uniforme sur toute sa longueur* (fig. 21), *alimentant sur son parcours différents écoulements* B, C, D *et* E *de débits déterminés : chacun de ces écoulements alimente, par exemple, un certain nombre de bornes-fontaines.*

Fig. 21.

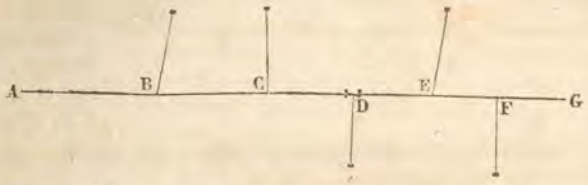



Il faut que le diamètre de la conduite soit tel, que la charge, à l'origine de chaque écoulement, soit suffisante pour que l'eau s'élève au moins à quelques décimètres au-dessus des orifices des bornes-fontaines alimentées par ces écoulements. Pour déterminer ce diamètre, on lui suppose une première valeur qu'on préjuge convenable; on détermine la perte de charge qui a lieu du point A, origine de la conduite, au point B, premier écoulement; ce que l'on fait en opérant comme au premier problème (168); car ayant le débit de cette partie AB, débit qui est égal à celui de toute la conduite, et son diamètre, la table du n° 167 donne la perte de charge par mètre; laquelle, multipliée par la distance des points A et B, qui est connue, donne la perte totale de charge pour la partie de conduite comprise entre ces deux points. Retranchant cette perte de la charge théorique au point B, c'est-à-dire de la différence de hauteur du point B et du niveau de l'eau dans le réservoir alimentaire placé au point A, on a la charge réelle au point B; charge qui doit être capable d'élever l'eau aux bornes-fontaines alimentées par l'écoulement B. On détermine ensuite la perte de charge qui a lieu du point B au point C; pour cela, on opère comme de A en B, en remarquant seulement que le volume débité par cette portion de conduite est égal à celui débité par la partie AB, moins le volume qui s'écoule par le branchement B. Ayant la perte de charge qui a lieu de B en C, on l'ajoute à celle trouvée pour la partie AB, ce qui donne la perte totale de A en C; laquelle, retranchée de la charge théorique en C, donne la charge réelle en ce point; charge qui doit aussi être suffisante pour produire l'écoulement par les bornes alimentées par le branchement C. On opère ensuite pour les parties successives CD, DE de la conduite comme pour les précédentes, et on voit si la charge à l'origine de tous les branchements est suffisante pour produire un écoulement convenable par les bornes. Si cette charge n'était pas suffisante, on essayerait un diamètre plus grand, et si l'on avait un excès de pression, on vérifierait un diamètre plus petit.

**171.** 4e Problème. *Déterminer les diamètres à donner aux deux portions d'une conduite recevant l'eau par ses deux extrémités* A *et* G

(fig. 22), *et alimentant sur son parcours différents écoulements* B, C, D, E, F *de débits déterminés.*

Fig. 22.




Dans ce cas, des écoulements sont alimentés par l'eau venant de A, et les autres par l'eau venant de G, et généralement un des écoulements reçoit une partie de son eau de l'extrémité A et l'autre partie de l'extrémité G; ainsi, par exemple, la quantité d'eau fournie par l'extrémité A est égale à la dépense des écoulements B, C, $\frac{1}{4}$ D, et celle fournie par l'extrémité G, à la dépense des écoulements F, E, $\frac{3}{4}$ D.

Le diamètre de chacune des parties AD et DG de la conduite doit être tel, que la charge à l'entrée de chaque branchement soit suffisante pour le débit de ce branchement, et, de plus, que la charge soit la même à l'entrée du branchement D pour chacune des portions de la conduite. On est donc obligé de procéder par tâtonnement pour arriver à la solution du problème. Pour cela, on assigne une première valeur à chacun des diamètres de AD et DG, et on détermine, en opérant comme dans le cas précédent (170), quelle est la charge à l'entrée de l'écoulement D. Si cette charge est la même pour les deux écoulements en sens contraire, et que la distribution se fasse convenablement par tous les branchements alimentés par chaque portion de la conduite principale, on adopte les diamètres supposés. Si, au contraire, ces conditions ne sont pas remplies, on augmente ou on diminue un ou les deux diamètres, selon que l'indiquent les résultats trouvés, et on continue le tâtonnement jusqu'à ce qu'on arrive à des diamètres satisfaisant aux conditions exigées.

**172.** 5e Problème. *Distribution d'eau au moyen d'une conduite de différents diamètres.*

Une telle distribution se compose d'une suite de conduites de diamètres différents, mais uniformes entre deux écoulements successifs, entre lesquels aussi le débit est constant. On résoudra donc ce problème d'après la marche suivie n° 170, en déterminant la perte de charge due à chaque conduite partielle en ayant égard, non-seulement à la diminution du débit, mais aussi à celle du diamètre. De là on conclura la charge effective à l'origine de chaque branchement, charge qui devra

être suffisante pour produire un écoulement convenable dans chacun d'eux.

**173.** 6e PROBLÈME. *Une conduite* AB (fig. 23) *est alimentée à son extrémité* A *par deux conduites* CA *et* DA *de débits donnés; il s'agit de déterminer les diamètres de ces conduites.*

Fig. 23.




On assigne une valeur au diamètre de AB; comme on connaît le débit de cette partie de la conduite, on obtient, au moyen de la table du n° 167, la perte de charge qui lui est due, et comme on a la différence de niveau des points A et B, on conclut qu'elle devra être la charge effective au point A. Assignant ensuite des valeurs aux diamètres des conduites CA et DA, comme on connaît le volume d'eau que doit amener chacune de ces conduites, au moyen de la table on obtient la perte de charge pour chacune d'elles, et on en conclut la charge effective au point A; charge qui doit être la même pour les deux conduites, et égale à celle qui a été calculée nécessaire pour produire un écoulement satisfaisant dans AB; s'il n'en était pas ainsi, on modifierait convenablement le diamètre d'une ou de deux, ou même des trois conduites partielles.

Si la quantité d'eau fournie par chacune des conduites CA et DA n'était pas déterminée, on pourrait faire varier, outre les diamètres des conduites, les quantités d'eau fournies, mais de manière que la somme de ces quantités soit égale à la dépense de AB. Dans tous les cas, la charge au point A doit être la même pour chacune des conduites CA et DA, et suffisante pour produire un écoulement convenable dans la partie AB.

**174.** *Pouce d'eau ou pouce de fontainier.* On évalue quelquefois le débit d'une conduite d'eau en pouces d'eau ou pouces de fontainier, qui équivaut à un débit de 0,000 222 166 de mètre cube par seconde, ou d'environ 13,33 litres par minute, ou encore de 19,195 3 mètres cubes par 24 heures.

La *ligne d'eau* est la 144e partie du pouce d'eau, ou 133,3 litres par 24 heures, et le *point d'eau*, la 144e partie de la ligne d'eau.

**175.** *Borne-fontaine.* Une borne-fontaine débite moyennement à Paris 0,001 78 de mètre cube par seconde, ce qui équivaut à peu près à 8 pouces de fontainier, ou 107 litres par minute. Son orifice est placé à $0^m,50$ au-dessus du sol, et il suffit, pour son alimentation, que l'eau puisse s'élever de quelques décimètres au-dessus de cet orifice.

A Dijon, le débit par minute des bornes-fontaines varie de 74 litres sous une charge de $2^m,078$ à 264 litres sous la charge de $17^m,001$, et le produit ordinaire est de 200 litres. Ce débit alimente et au delà une pompe à incendie qui lance, dans une marche continue, jusqu'à

235 litres par minute, ou seulement 170 litres environ, à cause des temps d'arrêt inévitables. La distance des bornes est de 100 mètres dans l'intérieur de la ville, et, y compris les faubourgs, la distance moyenne est de 150 mètres.

**176.** *Perte de charge due aux coudes.* Navier, en discutant les résultats obtenus par Dubuat, a posé la formule

$$p = \frac{v^2}{2g}\left(0.0039\,\frac{1}{r} + 0.0186\right)\frac{a}{r}.$$

$p$ perte de charge due au coude;
$v$ vitesse moyenne de l'eau dans le tuyau;
$\frac{v^2}{2g}$ hauteur correspondant à la vitesse $v$ (133);
$r$ rayon de l'arc formé par l'axe du coude;
$a$ développement de l'arc formé par l'axe du coude.

Cette formule fait voir que la perte de charge $p$ est proportionnelle au carré de la vitesse moyenne $v$ et à la longueur de l'arc $a$; qu'elle est fonction du rayon $r$, et indépendante du diamètre du tuyau; enfin qu'elle est d'autant plus petite que $r$ est plus grand.

Pour les diamètres de conduite successifs :

$0^m,05$ et $0^m,06$, $0^m,08$ et $0^m,10$, $0^m,15$, $0^m,20$, $0^m,25$ et au-dessus,

les valeurs de $r$ sont respectivement :

$0^m,45$, $0^m,50$, $0^m,75$, $1^m,00$, $1^m,50$.

Avec ces proportions, la perte de charge due aux coudes est très-faible près de la perte due au frottement de l'eau contre les parois des tuyaux, et comme dans la pratique les coudes sont généralement peu nombreux, on peut ordinairement négliger leur influence sur la perte de charge.

**177.** *Proportions des tuyaux de conduite.* L'épaisseur à donner à un tuyau cylindrique soumis à une certaine pression intérieure est donnée par la formule

$$e = \frac{hd}{2R}.$$

$e$ épaisseur du tuyau en millimètres;
$h$ pression intérieure du tuyau, exprimée en mètres de hauteur d'eau;
$d$ diamètre du tuyau en mètres;
R résistance à la traction de la matière dont est composé le tuyau, en kilogrammes par millimètre carré de section.

Pour la fonte, la résistance absolue à la traction varie de 12 à 14 kil. par millimètre carré de section; mais dans la pratique il convient, pour la stabilité des constructions, de réduire la traction à 3 et même à 2 kil.

Adoptant 2 kil. dans le cas des tuyaux de conduite, la formule précédente devient

$$e = \frac{hd}{4} = 0.25hd,$$

et si l'on exprime $e$ en mètres, on a

$$e = 0.000\,25hd.$$

Cette formule donne encore des épaisseurs inférieures à celles adoptées dans la pratique; cela tient à la difficulté d'obtenir sans défauts des tuyaux en fonte de $1^m,50$ à $2^m,50$ de longueur.

Dans les arts, les épaisseurs des tuyaux en fonte se déterminent à l'aide de la formule

$$e = 0^m,01 + 0,02d.$$

$e$ épaisseur du tuyau en mètres,
$d$ diamètre du tuyau en mètres.

C'est à l'aide de cette formule qu'ont été déterminées les épaisseurs des tuyaux consignés dans le tableau suivant, qui donne en outre les dimensions des autres parties de ces tuyaux. On doit essayer ces tuyaux à une pression de 10 atmosphères; on fait à cet effet usage d'une presse hydraulique du prix de 1200 fr. environ.

| DIAMÈTRES des tuyaux. | LONGUEURS totales des tuyaux. | | ÉPAISSEURS des tuyaux. | EMBOITEMENTS | | | BRIDES | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | avec emboîtement. | sans emboîtement. | | diamètres intérieurs. | longueurs. | épaisseurs. | diamètres extérieurs. | épaisseurs au collet. | fruits. | nombres de trous |
| m | m | m | m | m | m | m | m | m | m | |
| 0.05 | 1.60 | 1.50 | 0.0110 | 0.090 | 0.10 | 0.015 | 0.195 | 0.016 | 0.003 | 3 |
| 0.06 | *id.* | *id.* | 0.0112 | 0.100 | *id.* | *id.* | 0.205 | *id.* | *id.* | *id.* |
| 0.08 | 2.12 | 2.00 | 0.0116 | 0.120 | 0.12 | 0.016 | 0.225 | 0.020 | 0.004 | 4 |
| 0.10 | *id.* | *id.* | 0.0120 | 0.140 | *id.* | *id.* | 0.245 | 0.024 | *id.* | *id.* |
| 0.15 | 2.65 | 2.50 | 0.0130 | 0.195 | 0.15 | 0.020 | 0.301 | 0.025 | 0.005 | 6 |
| 0.20 | *id.* | *id.* | 0.0140 | 0.245 | *id.* | *id.* | 0.355 | 0.030 | *id.* | *id.* |
| 0.25 | *id.* | *id.* | 0.0150 | 0.300 | *id.* | *id.* | 0.410 | 0.035 | *id.* | *id.* |
| 0.30 | *id.* | *id.* | 0.0160 | 0.350 | *id.* | *id.* | 0.470 | 0.040 | *id.* | 8 |
| 0.35 | 1.70 | 2.50 | 0.0170 | 0.410 | 0.20 | 0.025 | 0.530 | 0.045 | *id.* | *id.* |
| 0.40 | *id.* | *id.* | 0.0180 | 0.460 | *id.* | *id.* | 0.585 | *id.* | *id.* | 9 |
| 0.45 | *id.* | *id.* | 0.0190 | 0.510 | *id.* | *id.* | 0.650 | *id.* | *id.* | *id.* |
| 0.50 | *id.* | *id.* | 0.0200 | 0.560 | *id.* | *id.* | 0.700 | *id.* | *id.* | 12 |
| 0.60 | *id.* | *id.* | 0.0220 | 0.660 | *id.* | *id.* | 0.800 | *id.* | *id.* | *id.* |

Les tuyaux de $0^m,10$ et au-dessous sont garnis, sur leur longueur, de 2 filets de $0^m,08$ de largeur sur $0^m,0035$ à $0^m,004$ de saillie, et ceux d'un diamètre supérieur, de 3 filets ayant $0^m,08$ de largeur sur $0^m,005$ de saillie.

Les cordons placés aux extrémités des tuyaux ont, pour le petit bout, un diamètre égal au 1/10 environ de la longueur de l'emboîtement dans lequel ils pénètrent; pour le gros bout, c'est-à-dire pour l'emboîtement, ce diamètre est égal à l'épaisseur de l'emboîtement. Ces cordons font une saillie égale à leur rayon sur le corps du tuyau ou de l'emboîtement.

A l'aide du tableau précédent, il sera facile de déterminer, par analogie, les proportions à donner à un tuyau en fonte d'un diamètre quelconque.

Les diamètres des tuyaux dont on fait usage à Paris ayant été fixés en anciennes mesures, quelques-uns diffèrent, comme le fait voir le tableau suivant, de ceux du tableau précédent; mais les autres parties des tuyaux sont proportionnées de la même manière.

*Poids des tuyaux coulés horizontalement, anciens modèles employés à Paris.*

| DIAMÈTRES des tuyaux. | EMBOÎTEMENT et cordon. | BRIDE et cordon. | EMBOÎTEMENT et bride. | DEUX emboîtements. | DEUX brides. |
|---|---|---|---|---|---|
| m. | kil. | kil. | kil. | kil. | kil. |
| 0.081 | 50 | 47 | 54 | 57 | 51 |
| 0.108 | 75 | 72 | 81 | 84 | 78 |
| 0.135 | 125 | 122 | 132 | 135 | 129 |
| 0.162 | 150 | 141 | 158 | 162 | 149 |
| 0.190 | 200 | 189 | 209 | 220 | 198 |
| 0.216 | 230 | 218 | 242 | 254 | 230 |
| 0.250 | 283 | 271 | 307 | 319 | 285 |
| 0.300 | 355 | 331 | 374 | 395 | 347 |
| 0.325 | 385 | 357 | 402 | 430 | 374 |
| 0.350 | 416 | 385 | 435 | 466 | 404 |
| 0.400 | 509 | 470 | 532 | 571 | 493 |
| 0.500 | 687 | 619 | 714 | 782 | 646 |
| 0.600 | 820 | 755 | 850 | 910 | 790 |

**178.** (Les résultats de ce numéro nous ont été communiqués par notre camarade, M. Corot.) Depuis quelques années on coule les tuyaux debout. Avec cette précaution, on peut diminuer les épaisseurs; ainsi, au lieu de les calculer avec la formule du numéro précédent, on adopte celles fournies par la suivante, dans laquelle les lettres ont les mêmes significations :

$$e = 0^{m},008 + 0,016d.$$

La *fig.* 24 représente la coupe de deux tuyaux de $0^{m},50$ de diamètre, nouveaux modèles, l'un à emboîtement et l'autre à bride. Les cotes expriment des millimètres.

Fig. 24.

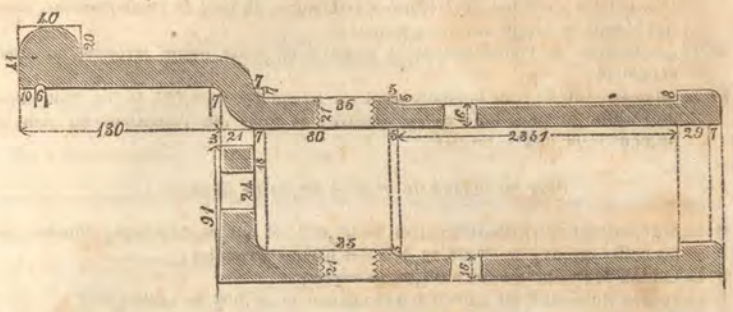



*Tableau des proportions et des poids des tuyaux coulés debout, nouveaux modèles employés à Paris.* Ce tableau contient en outre les poids des coudes, et ceux des tubulures que l'on fait venir sur les tuyaux pour les branchements de la conduite. Les rayons des coudes sont proportionnés comme au n° 176. Pour les tuyaux de 0m,25 de diamètre et au-dessus, on ne fait plus de coudes au 1/4 de circonférence.

| DIAMÈTRES des tuyaux. | DIAMÈTRES des emboîtements. | ÉPAISSEURS. | EMBOÎTEMENT et cordon. | BRIDE ET CORDON. | EMBOÎTEMENT et bride. | DEUX EMBOÎTEMENTS. | DEUX BRIDES. | COUDES 1/4 de circonférence. | COUDES 1/8 de circonférence. | COUDES 1/12 de circonférence. | POIDS A AJOUTER pour une tubulure. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| m. | m | m. | k. | k. | k. | k. | k. | k. | k. | k. | k. |
| 0.060 | » | » | » | » | » | » | » | » | » | » | 8 |
| 0.081 | 0.120 | 0.0095 | 56 | 54 | 63 | 66 | 60 | 28 | 18 | » | 11 |
| 0.108 | 0.148 | 0.0100 | 78 | 75 | 85 | 90 | 83 | 40 | 25 | » | 13 |
| 0.135 | 0.175 | 0.0100 | 95 | 90 | 105 | 110 | 100 | 60 | 40 | » | 16 |
| 0.162 | 0.203 | 0.0105 | 120 | 115 | 125 | 130 | 122 | » | » | » | 21 |
| 0.190 | 0.232 | 0.0110 | 145 | 140 | 155 | 160 | 150 | » | » | » | 23 |
| 0.216 | 0.259 | 0.0115 | 170 | 165 | 180 | 185 | 175 | » | » | » | 27 |
| 0.250 | 0.298 | 0.0120 | 210 | 195 | 220 | 235 | 205 | » | » | » | 30 |
| 0.300 | 0.350 | 0.0130 | 270 | 255 | 285 | 300 | 265 | » | » | » | 36 |
| 0.325 | 0.376 | 0.0135 | 300 | 285 | 315 | 335 | 295 | » | » | » | » |
| 0.350 | 0.401 | 0.0140 | 335 | 315 | 350 | 370 | 330 | » | » | » | 42 |
| 0.400 | 0.453 | 0.0145 | 390 | 370 | 420 | 440 | 400 | » | » | » | 50 |
| 0.500 | 0.556 | 0.0160 | 530 | 500 | 545 | 590 | 540 | » | 500 | » | » |
| 0.600 | 0.660 | 0.0180 | 710 | 670 | 760 | 790 | 725 | » | » | 515 | » |

*Pour les tuyaux de 0m,081 à 0m,216 de diamètre :*

1° L'épaisseur à l'emboîtement est égale à l'épaisseur du corps du tuyau plus 0m,004; cette surépaisseur se prolonge au delà des parties arrondies, sur une longueur de 0m,08;

2° Le cordon de l'emboîtement a 0m,01 de rayon;

3° Le cordon du petit bout a 0m,016 de longueur et 0m,006 de saillie sur le corps du

tuyau; il convient d'arrondir l'arête extérieure sur un rayon égal à celui des petites parties arrondies, intérieure et extérieure, du fond de l'emboîtement, rayon que donne le dessin du tuyau projeté;

4° La profondeur de l'emboîtement, y compris la petite partie arrondie du fond, est $0^m,11$;

5° Le diamètre intérieur de l'emboîtement est tel qu'il y a $0^m,004$ de jeu tout autour du cordon du petit bout qui y pénètre; de sorte que l'épaisseur du joint est $0^m,006 + 0^m,004 = 0^m,010$.

*Pour les tuyaux de $0^m,25$ à $0^m,60$ de diamètre :*

1° La surépaisseur de l'emboîtement est de $0^m,005$, et elle se prolonge, comme pour les petits tuyaux, de $0^m,08$ au delà des parties arrondies;

2° Le cordon de l'emboîtement a $0^m,02$ de rayon;

3° Le cordon du petit bout a $0^m,036$ de longueur et $0^m,008$ de saillie;

4° La profondeur de l'emboîtement, y compris la petite partie arrondie, est $0^m,13$;

5° Le joint a $0^m,008 + 0^m,004 = 0^m,012$ d'épaisseur.

*Pour tous les tuyaux :*

1° La longueur, comptée du petit bout au fond de l'emboîtement, est $2^m.50$; de sorte que la longueur totale est $2^m,50 + 0^m,11 = 2^m,61$ pour les tuyaux de $0^m081$ à $0^m,216$ de diamètre, et $2^m,50 + 0^m,13 = 2^m,63$ pour ceux de $0^m,25$ à $0^m,60$. Ces longueurs sont celles nécessaires pour que chaque bout représente en place $2^m,50$ de conduite;

2° Le prolongement sur une longueur de $0^m,08$ de la surépaisseur de l'emboîtement remplace les filets des anciens modèles;

3° La longueur de la grande partie arrondie formant le fond de l'emboîtement, mesurée suivant l'axe du tuyau, est égale à l'épaisseur à l'emboîtement;

4° Quand il y a une bride, elle remplace simplement l'emboîtement et la grande partie arrondie formant le fond de l'emboîtement. Comme l'épaisseur de la bride à l'extérieur est égale à cette grande partie arrondie ou à l'épaisseur de l'emboîtement, et que le fruit de la bride, de l'arête intérieure à l'arête extérieure, est de $0^m,003$, il en résulte que la longueur totale d'un tuyau avec bride d'un bout et cordon de l'autre est $2^m,50 + 0^m,003$;

5° Sur tout le contour intérieur de l'emboîtement, à $0^m,01$ du bout, règne un petit refouillement de $0^m,006$ de diamètre destiné à retenir le plomb formant le joint.

6° La longueur du joint en plomb est de $0^m,04$; le reste en dessous est rempli de corde goudronnée.

*Diamètres des tuyaux :*

| | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| m 0,081, | m 0,108, | m 0,135, | m 0,162, | m 0,19, | m 0,216 à 0,25, | m 0,30, | m 0,325, | m 0,35, | m 0,40, | m 0,50, | m 0,60. | |

*Nombres de boulons des brides :*

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3, | 4, | 5, | 6, | 6, | 6, | 8, | 8, | 9, | 9, | 12, | 14. |

*Distances des trous aux arêtes extérieures des brides :*

| | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| m 0,012, | m 0,012, | m 0,014, | m 0,015, | m 0,015, | m 0,016, | m 0,016, | m 0,016, | m 0,018, | m 0,018, | m 0,018, | m 0,018. |

Les tiges des boulons sont carrées et ont $0^m,021$ de côté pour les tuyaux de $0^m,25$ et au-dessous, et $0^m,024$ pour ceux de $0^m,30$ et au-dessus.

TABLEAU DES PRIX :

1° *D'un mètre linéaire de conduite en fonte, compris fourniture et pose;*
2° *D'un mètre linéaire de conduite en tôle et bitume, compris fourniture et pose;*
3° *Des robinets-vannes.*

| DIAMÈTRES. | 1° MÈTRE LINÉAIRE DE CONDUITE EN FONTE. | | | | | | 2° MÈTRE courant de conduite en tôle et bitume (2) | 3° ROBINET-VANNE. | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Poids du tuyau de 2in.50. | Poids du mètre linéaire. | Prix du kilogr. de fonte. | Dépense pour fourniture de fonte. | Prix de pose du mètre linéaire. (1) | Prix du mètre linéaire compris fourniture et pose. | | Fourniture. (3) | Pose. (4) | Total. |
| m. | k. | k. | fr. | fr. | fr. | fr. | fr. | fr. | fr. | fr. |
| 0.081 | 56 | 22.40 | 0.20 | 4.48 | 4.00 | 8.48 | 3.50 | 152 | 13 | 165 |
| 0.108 | 78 | 31.20 | *id.* | 6.24 | 4.50 | 10.74 | 4.90 | 183 | 17 | 200 |
| 0.135 | 95 | 38.00 | *id.* | 7.60 | 5.00 | 12.60 | 6.55 | 244 | 21 | 265 |
| 0.162 | 120 | 48.00 | *id.* | 9.60 | 5.50 | 15.10 | 8.20 | 295 | 25 | 320 |
| 0.190 | 145 | 58.00 | *id.* | 11.60 | 6.00 | 17.60 | 10.30 | 334 | 26 | 360 |
| 0.216 | 170 | 68.00 | *id.* | 13.60 | 7.00 | 20.60 | 12.35 | 352 | 28 | 380 |
| 0.250 | 210 | 84.00 | *id.* | 16.80 | 8.00 | 24.80 | 14.65 | 430 | 30 | 460 |
| 0.30 | 270 | 108.00 | *id.* | 21.60 | 9.00 | 30.60 | 19.80 | 469 | 41 | 510 |
| 0.325 | 300 | 120.00 | *id.* | 24.00 | 9.50 | 33.50 | 22.80 | » | » | » |
| 0.35 | 335 | 134.00 | *id.* | 26.80 | 10.00 | 36.80 | 26.15 | 572 | 48 | 620 |
| 0.40 | 390 | 156.00 | *id.* | 31.20 | 12.00 | 43.20 | 29.60 | 685 | 55 | 740 |
| 0.50 | 530 | 212.00 | *id.* | 42.40 | 15.00 | 57.40 | 43.05 | 940 | 65 | 1005 |
| 0.60 | 710 | 284.00 | *id.* | 56.80 | 18.00 | 74.80 | » | 1185 | 75 | 1260 |

(1) N° 23 du bordereau de la fontainerie (travaux neufs).
(2) Tarif Chameroy.
(3) Prix extraits du tableau dressé, le 20 mars 1851, par l'ingénieur de la 1re section.
(4) N° 27 du bordereau de la fontainerie (travaux neufs).
(5) N° 58 *id.*

| VENTOUSE FLOTTEUR. | |
|---|---|
| | fr. |
| Fourniture. | 67 |
| Pose (5).. . | 8 |
| | 75 |

**179.** On a coulé des tuyaux en plomb jusqu'au diamètre de 0m,216; ils avaient 4 mètres de longueur. En 1818, on a étiré les tuyaux, mais sans dépasser le diamètre de 0m,108. Depuis 1840, on comprime le plomb sous un piston de presse hydraulique, et on l'oblige à passer par un orifice annulaire, d'où il sort en tuyaux. On atteint ainsi jusqu'au diamètre de 0m,10; mais au-dessus de cette limite, les tuyaux se font avec des plaques de plomb que l'on soude après les avoir roulées.

La longueur des tuyaux en plomb est de 3m,90. Pour les joindre entre eux, on taille leurs extrémités en sifflet, afin que l'un pénètre un peu dans l'autre, et on fait un nœud de soudure, lequel, pour les diamètres successifs de tuyaux :

$0^m,04$, $0^m,06$, $0^m,08$, $0^m,11$, $0^m,16$, $0^m,19$, $0^m,22$,

pèse respectivement :

$2^k,25$, $3^k,50$, $4^k,50$, $6^k,00$, $9^k,00$, $11^k,00$, $13^k,00$.

Pour calculer l'épaisseur à donner à un tuyau en plomb, on peut se servir de la formule donnée n° 177,

$$e = \frac{hd}{2R}.$$

D'après des expériences de Navier, la ténacité absolue du plomb est de $1^k,35$ par millimètre carré de section, et la charge sous laquelle le plomb commence à s'étendre varie entre la moitié et les deux tiers de la résistance absolue. Une autre expérience, faite par M. Jardiné, a donné $1^k,37$ pour la résistance absolue, et $1^k,14$ pour la charge à laquelle commence la dilatation.

Adoptant $1^k,30$ pour la ténacité absolue, cette résistance étant 10 fois plus petite que celle de la fonte, il paraît naturel de donner aux tuyaux en plomb 10 fois plus d'épaisseur qu'à ceux en fonte placés dans les mêmes circonstances. Cependant, comme on fait facilement, même sous une faible épaisseur, des tuyaux en plomb homogènes dans toutes leurs parties, et que ces tuyaux ont moins à redouter des chocs, on peut, dans la formule précédente, faire R égal au 1/4 de la résistance absolue, c'est-à-dire à $0^k,325$. C'est à peu près la résistance adoptée pour les tuyaux en fonte coulés debout.

*TABLEAU des épaisseurs des tuyaux en plomb anciennement adoptés dans la distribution des eaux de Paris, et des pressions intérieures auxquelles ils sont soumis quand la tension* R *de la matière est* $0^k.325$.

| DIAMÈTRE $d$. | ÉPAISSEUR $e$. | PRESSION | |
|---|---|---|---|
| | | $h$. | en atmosphères. |
| m. | millim. | m. | |
| 0.027 | 6.8 | 163.67 | 15.84 |
| 0.041 | 9.0 | 142.70 | 13.81 |
| 0.054 | 9.0 | 108.29 | 10.48 |
| 0.068 | 12.3 | 118.00 | 11.42 |
| 0.081 | 12.3 | 98.68 | 9.55 |
| 0.108 | 12.3 | 73.98 | 7.16 |
| 0.135 | 13.5 | 64.99 | 6.29 |
| 0.162 | 13.5 | 54.14 | 5.24 |
| 0.216 | 13.5 | 40.61 | 3.93 |
| 0.25 | 15.8 | 41.02 | 3.97 |
| 0.32 | 15.8 | 32.03 | 3.10 |
| 0.65 | 35.0 | 25.03 | 3.39 |

D'après les résultats de ce tableau, il n'y a plus lieu de s'étonner des fréquentes réparations qu'exigeaient les tuyaux de Versailles et de Paris, puisque les pressions dans les gros diamètres atteignaient les tensions limites.

D'après Bélidor, un tuyau en plomb de $0^m,33$ de diamètre et $0^m,02$ d'épaisseur peut résister à une pression de 3 atmosphères; c'est ce que confirme le tableau précédent. Les tuyaux du parc de Versailles ont $0^m,035$ d'épaisseur pour un diamètre de $0^m,65$; ce sont les derniers du tableau.

On fait encore des tuyaux en bois. Leur résistance à la traction est très-grande; mais ils sont promptement détruits par la pourriture. Les bois employés à la confection de ces tuyaux sont le chêne, l'aulne et l'orme.

**180.** *Service des eaux dans les villes.* Il existe à Paris 5 réservoirs établis sur des points culminants pour alimenter les quartiers qui les environnent et faciliter l'arrivée de l'eau en cas d'incendie : ce sont les réservoirs du Panthéon, 3 bassins; Racine, 3 bassins; Vaugirard, 2 bassins; Monceau, 1 bassin, et Ménilmontant, 1 bassin. La capacité réunie de ces réservoirs s'élève à 28 millions 1/2 de litres d'eau.

Le nombre des fontaines de Paris est de 94, parmi lesquelles on compte 26 fontaines monumentales.

La Seine, les eaux d'Arcueil, le canal de l'Ourcq et le puits de Grenelle alimentent ces fontaines par les établissements ci-après : 31 par l'aqueduc de ceinture, 19 par le réservoir de Chaillot, 16 par le pont Notre-Dame, 7 par l'aqueduc d'Arcueil, 7 par le réservoir de Monceau, 7 par le canal de l'Ourcq, 3 par la pompe à feu de Chaillot, 2 par le puits de Grenelle, 1 par le bassin Saint-Victor, et 1 par le réservoir de Vaugirard.

A ces fontaines publiques, on doit ajouter 14 fontaines marchandes, 62 poteaux d'arrosement, 65 bouches de service pour incendie, 54 bouches d'eau sous trottoirs destinées, avec les bornes-fontaines, au lavage de la voie publique, et enfin 1844 bornes-fontaines.

Le total des appareils de distribution d'eau pour l'usage public et sur toute la surface de la ville s'élève à 2033. Ces appareils, y compris les concessions particulières, fournissent par jour une quantité de 69 480 000 litres d'eau; ce qui fait à peu près 69 litres d'eau par jour et par individu (extrait d'un rapport de M. Sari à la commission municipale).

D'un rapport sur un projet de distribution d'eau dans Madrid, de MM. Eugène Flachat et E. Lorentz, nous extrayons les chiffres suivants (Compte rendu des travaux de la Société des ingénieurs civils) :

Dans la marine, où le pain est fait d'avance, où l'on ne lave le linge et ne nettoie à fond le navire qu'en relâche, la consommation de chaque homme est réglée à environ 3 litres par jour; on peut donc estimer à environ 5 litres la limite inférieure de la consommation d'eau.

M. R. Thom évalue à environ 58 litres par tête et par jour la quantité d'eau maximum que réclame une abondante et large distribution.

Pour une famille d'ouvriers aisés et très-propres, composée de la mère, du père, d'une fille nubile et de deux autres enfants, M. Gravatt estime ainsi la consommation hebdomadaire (enquête de 1844) :

| | |
|---|---|
| Lavage des légumes | 63 litres. |
| Thé et lavage des ustensiles | 64 |
| Cuisson des légumes et autres mets | 64 |
| Propreté personnelle | 127 |
| Lavage des planchers des deux chambres, une fois par semaine | 45 |
| Blanchissage du linge et des vêtements | 227 |
| Arrosage d'un jardinet | 45 |
| Total | 635 litres. |
| Soit par jour et par tête | 18 litres. |
| Auxquels on peut ajouter : | |
| Pour water-closet, environ | 4 |
| Bains | 3 |
| Usages industriels (à Londres ils n'exigent que 8 litres) | 15 |
| Total | 40 litres. |

Dans ce dernier chiffre tout est compris, sauf les quantités nécessaires aux besoins des animaux et à ceux d'irrigations des cours, jardins et façades de maisons, dépenses d'ailleurs exceptionnelles; d'autre part, on a forcé tous les chiffres ci-dessus.

Plus récemment, la commission générale de salubrité, dans son rapport sur l'alimentation de Londres, estime que, pour subvenir aux plus larges besoins des particuliers, y compris l'eau des grands consommateurs et industriels, ainsi que celle que demandera l'abolition complète des fosses, il faudra, par tête et par jour, moins de. . . 51,00 litres.

A ce nombre, elle ajoute pour nouveaux bains, nouvelles industries et éventualités. . . . . 11.80

En tout. . . . . 62,80

Dans le Midi, la chaleur surexcite la consommation; dans le Nord, la fumée, la boue, créent des besoins de propreté qui n'ont pas une influence beaucoup moindre. Cependant MM. Flachat et Lorentz ont adopté 70 litres pour Madrid; ils jugent ce chiffre de beaucoup au-dessus des besoins les plus larges, mais il offre l'avantage de donner toute sécurité relativement à de grands développements industriels, à l'extension de l'usage des bains et à l'imprévu.

A Paris, les fontaines jaillissantes débitent 13 200 mètres cubes d'eau par jour; mais, d'après M. Darcy, il convient de porter ce chiffre à 18 000 mètres cubes, ce qui fait 18 litres par jour par habitant.

D'une enquête faite avec soin, il résulte qu'à Londres le volume total

nécessaire, par tête et par jour, pour satisfaire largement aux besoins publics est :

| | |
|---|---|
| Arrosage et ébouage des rues. . . . . | 23 litres 60 c. |
| Incendies et éventualités. . . . . | 8 » |
| Total. . . . . | 31 litres 60 c. |

Soit moitié du volume 62l,80 attribué, par le projet, aux besoins des particuliers.

MM. Flachat et Lorentz ont adopté, dans le projet de Madrid, part égale, 70 litres, pour les besoins d'édilité, quantité qui les assure d'avoir largement pourvu à l'écoulement des fontaines jaillissantes. Ce chiffre de 70 litres approche de ceux des projets de Lyon et de Cette.

De toutes les considérations qui précèdent, il paraît résulter que la consommation de 150 litres par jour et par habitant est plus que suffisante pour tous les besoins d'une ville. Cependant, dans le nouveau projet de distribution d'eau dans Paris, dû à M. Belgrand, cette quantité serait portée à 170 litres, et c'est à ce résultat que M. Darcy arrive dans son *Étude de la distribution d'eau dans les villes* (*fontaines publiques de la ville de Dijon*).

*TABLEAU des quantités d'eau distribuées dans quelques villes, par jour et par habitant.*

| NOMS DES VILLES. | POPULATIONS. | EAU FOURNIE. | COURS D'EAU sur lesquels sont les villes. |
|---|---|---|---|
| | | litres. | |
| Rome ancienne. | 1 200 000 | 1 084 | Tibre. |
| Rome moderne. | 136 000 | 1 105 | Tibre. |
| New-York. . . . | 312 000 | 568 | » |
| Marseille. . . . | 185 000 | 470 | » |
| Carcassonne. . . | 15 500 | 400 | Aude et canal du Languedoc. |
| Besançon. . . . | 35 000 | 246 | Canal. |
| Dijon. . . . . | 25 500 | 240 | Ouche et torrent de Suzon. |
| Philadelphie. . . | 240 000 | 225 | Schuylkill et Delaware. |
| Richemond. . . | 20 000 | 180 | James. |
| Bordeaux. . . . | 132 000 | 170 | Garonne. |
| Glasgow. . . . . | 395 000 | 113 | Clyde et 3 canaux. |
| Londres. . . . . | 1 924 000 | 112 | Tamise et New-River. |
| Gênes. . . . . | 90 000 | 110 | Bisagno, Rochetta, Polievera. |
| Cette. . . . . | 18 000 | Projet 106 | » |
| Lyon. . . . . | 206 000 | 85 | Rhône, Saône et sources. |
| Narbonne. . . . | 10 500 | 85 | Canal. |
| Manchester. . . | 180 000 | 84 | 2 canaux et 2 petits cours d'eau. |
| Bruxelles. . . . | 250 000 | 80 | » |
| Toulouse. . . . | 52 000 | 80 | Garonne et canal. |
| Munich. . . . . | 90 000 | 80 | Isar et canaux. |
| Genève. . . . . | 50 000 | 74 | Lac Léman et Rhône. |
| Paris. . . . . | 1 000 000 | 69 | Seine, Ourcq, Bièvre. |
| Nantes. . . . . | 100 000 | 60 | Loire. |

## MOTEURS HYDRAULIQUES.

**181.** Pour l'établissement d'un moteur hydraulique, la chute dont on peut disposer, dite *chute disponible*, est égale à la chute totale du cours d'eau, c'est-à-dire à la différence de niveau de l'eau en aval de la première des usines d'amont et de l'eau dans le canal d'aval de l'usine à établir, diminuée de la pente nécessaire à l'écoulement de l'eau entre les deux usines et de celle nécessaire au chenal qui conduit l'eau dans le canal d'aval (160).

**182.** *Niveau des eaux.* Dans l'établissement d'un canal ou d'un barrage, on ne peut tenir les eaux à un niveau supérieur à $0^m,20$ en contre-bas des terrains environnants, à moins qu'on ne soit autorisé à construire des digues le long des rives.

**183.** *Roues à aubes planes recevant l'eau en dessous, ou roues à choc.* Pour que, dans une roue verticale à aubes planes recevant l'eau en dessous, il y ait équilibre dynamique, on doit avoir théoriquement, d'après M. Belanger,

$$\mathcal{T}'_m = \frac{1}{2} m\mathrm{V}^2 - \frac{1}{2} m(\mathrm{V}-v)^2 - \frac{1}{2} mv^2 - \frac{1}{2} mgh' \left(\frac{\mathrm{V}}{v} - \frac{v}{\mathrm{V}}\right).$$

$m$ masse de l'eau dépensée par seconde (20);
V vitesse d'arrivée de l'eau sur la roue,
$v$ vitesse que conserve l'eau en quittant la roue, ou vitesse du centre d'impulsion des aubes;
$h'$ épaisseur de la lame fluide à sa sortie de la roue;
$\mathcal{T}'_m$ quantité de travail produite par seconde;
$\frac{1}{2} m\mathrm{V}^2$ force vive que possède l'eau au moment de son choc sur la roue (29);
$\frac{1}{2} m(\mathrm{V}-v)^2$ perte de force vive due au choc de l'eau sur la roue;
$\frac{1}{2} mv^2$ perte de force vive due à la vitesse que conserve l'eau en quittant la roue.

En négligeant, comme on l'a fait jusqu'à présent, le terme $-\frac{1}{2} mgh' \left(\frac{\mathrm{V}}{v} - \frac{v}{\mathrm{V}}\right)$, dû à l'élévation de niveau de l'eau en passant de la vitesse V à celle $v$, on a

$$\mathcal{T}'_m = \frac{1}{2} m\mathrm{V}^2 - \frac{1}{2} m(\mathrm{V}-v)^2 - \frac{1}{2} mv^2, \quad \text{d'où} \quad \mathcal{T}'_m = mv(\mathrm{V}-v).$$

Ce qui fait voir que, pour une même valeur de V, $\mathcal{T}'_m$ sera le plus grand possible quand le produit $v(\mathrm{V}-v)$ sera maximum; ce qui existera quand on aura $v = \mathrm{V}-v$ ou $\mathrm{V} = 2v$; car si l'on considère V comme étant le diamètre d'un cercle, $v(\mathrm{V}-v)$ sera égal au carré d'une perpen-

diculaire abaissée d'un point de la circonférence sur le diamètre qu'elle divise en deux segments $v$ et $V-v$ (*Int.*, 619); or cette perpendiculaire, et par suite son carré, aura la plus grande valeur possible, quand elle passera au centre (*Int.*, 945), ce qui donnera bien $v = V-v$. De plus, en examinant de quelle manière varie la perpendiculaire en faisant varier $v$ et par suite $V-v$, on voit qu'elle ne change pas sensiblement tant que $v$ reste compris entre $\frac{1}{3}$ et $\frac{2}{3}$ de V. Ainsi, pour ce genre de roues, l'effet maximum aura lieu quand la vitesse de la roue sera moitié de la vitesse avec laquelle l'eau vient la frapper, et cet effet maximum ne diminuera pas sensiblement tant que $v$ restera compris entre $\frac{1}{3}$ et $\frac{2}{3}$ de V.

Remplaçant dans le second membre de la formule précédente $v$ par $\frac{V}{2}$, on a

$$\mathcal{T}_m = \frac{mV^2}{4} = \frac{Ph}{2}.$$

$P = mg$ poids d'eau dépensé par seconde (22);

$h = \frac{V^2}{2g}$ chute effective, que l'on prend égale à la différence de niveau de l'eau en amont de la vanne et derrière la roue (133);

Cette dernière formule fait voir que l'effet utile maximum n'est que moitié du travail total dépensé.

Dans la dernière valeur de $\mathcal{T}_m$, on fait $V^2 = 2gh$, ce qui suppose que la hauteur du niveau de l'eau dans le bief supérieur, au-dessus du centre de gravité de l'ouverture de la vanne, est égal à $h$, et que la vitesse de l'eau n'est pas diminuée entre la vanne et la roue (134).

Les pertes d'eau et les divers frottements, qu'on a négligés dans l'établissement des formules précédentes, font que le travail utile effectif n'est que les 0,60 environ du travail moteur théorique; ainsi on a seulement

$$\mathcal{T}_m = 0{,}60\,\frac{Ph}{2} = 0{,}30Ph.$$

Avec de bonnes dispositions de roues, on peut augmenter cet effet utile.

La théorie donne $v = \frac{1}{2}$ V pour le maximum d'effet; mais les roues construites fournissent ordinairement $v = \frac{2}{5}$ V.

L'effet utile de ce genre de roues est faible; mais comme il est indépendant du diamètre de la roue, que l'on peut faire varier de 2 mètres à 8 mètres, et que de plus on peut, sans altérer sensiblement cet effet utile, faire varier la vitesse dans des limites étendues, ces roues sont

convenables quand on a besoin d'une grande vitesse directe de rotation, et surtout quand on est obligé de faire varier cette vitesse dans des limites étendues.

Il convient, pour que la marche de la roue soit régulière, que sa vitesse au centre d'impulsion des aubes ne soit pas inférieure à un mètre.

Le jeu entre les aubes et le coursier ne peut guère être inférieur à $0^m,01$, et il s'élève parfois à $0^m,02$ et $0^m,03$.

Il convient d'incliner la vanne, afin de rapprocher, autant que possible, son ouverture du point d'action de l'eau sur la roue; ce qui diminue les frottements de l'eau dans le coursier, et augmente le coefficient de dépense de la vanne (146).

D'après M. Belanger, on peut conclure qu'il convient de donner au fond du coursier, entre la vanne et la roue, une inclinaison de 1/12 à 1/15; de le faire concentrique à la roue sur une étendue au moins égale au double de l'intervalle de deux aubes consécutives, divisée en deux parties égales par la verticale passant par l'axe de la roue; de prolonger ensuite le fond du coursier par un plan de $1^m,50$ à 2 mètres de longueur se raccordant avec le canal de fuite; ce plan étant incliné de manière qu'au point où il se raccorde avec le canal de fuite, la profondeur d'eau soit égale ou un peu supérieure au double de la levée de la vanne. On incline ensuite le canal de fuite de 1/15 sur une longueur de 10 mètres, et, de plus, si les localités le permettent, on l'élargit graduellement de $0^m,50$ de chaque côté pour cette longueur de 10 mètres; il faut éviter de faire cet élargissement d'une manière brusque.

D'après M. Belanger, il y a théoriquement avantage de faire plonger les aubes, quelle que soit leur vitesse, tant que leur enfoncement dans l'eau ne dépasse pas l'épaisseur de la veine fluide, et même plus si la vitesse est très-grande. La pratique a confirmé cet avantage, tant que la partie plongée des aubes ne dépasse pas les 2/3 ou les 3/4 de l'épaisseur de la lame fluide, et elle a appris, en outre, qu'il n'y avait aucun inconvénient à faire plonger les aubes de toute l'épaisseur de la lame. D'après cela, il y a donc lieu de tenir le fond du coursier au-dessous du niveau de l'eau en aval de la roue.

La hauteur des aubes varie entre 2 fois 1/2 et 3 fois la levée verticale de la vanne, et leur distance, mesurée sur la circonférence passant par leur centre, entre 1 fois et 1 fois 1/2 leur hauteur.

Le nombre des aubes doit être le nombre pair le plus rapproché de 6 fois le diamètre moyen de la roue exprimé en mètres; la difficulté de placer convenablement ce nombre d'aubes, à cause de la position des bras, peut seule le faire modifier.

D'après Deparcieux, une inclinaison de 20 à 22° des aubes sur le rayon, du côté qu'elles reçoivent l'eau, augmente un peu l'effet utile de la roue; cependant d'autres expériences de Bossut avaient confirmé le

contraire, et dans la pratique il ne convient guère de les incliner que quand la roue est sujette à être noyée, parce qu'alors cette disposition permet aux aubes de sortir plus facilement de l'eau.

La chute maxima convenable à ce genre de roues est $1^m,30$; pour des chutes plus grandes, le choc de l'eau contre la roue donne une perte de force vive considérable.

*Application.* La dépense est 700 litres d'eau par seconde, et la chute $1^m,06$; quel est le travail moteur que rendra la roue?

Remplaçant P et $h$ par leurs valeurs dans l'expression de $\mathcal{T}_m$, on a

$$\mathcal{T}_m = 0{,}30 \times 700 \times 1{,}06 = 222^{km},6.$$

Ce qui fait $$\frac{222{,}6}{75} = 2{,}97 \text{ chevaux-vapeur.}$$

Ayant (134) $$V = \sqrt{2gh} = 4^m,56,$$

la vitesse de la roue, au centre d'impulsion des aubes, doit être de $2^m,28$.

La roue devant faire 9 tours par minute, par exemple, son rayon $r$, mesuré au centre d'impulsion des aubes, se déduit de l'équation

$$2\pi r \times 9 \quad \text{ou} \quad 2 \times 3{,}14 \times r \times 9 = 2^m,28 \times 60,$$

d'où

$$r = \frac{2{,}28 \times 60}{2 \times 3{,}14 \times 9} = 2^m,42.$$

184. *Roues à aubes courbes recevant l'eau en dessous, dites roues à la* Poncelet (*fig.* 25).

Pour que dans une roue à la Poncelet il y ait équilibre dynamique, on doit avoir

$$\mathcal{T}_m = \frac{1}{2} mV^2 - \frac{1}{2} m(V - 2v)^2.$$

$m$ masse de l'eau dépensée par seconde (20);
$V$ vitesse d'arrivée de l'eau sur la roue;
$v$ vitesse de la roue;
$V - 2v$ vitesse absolue que conserve l'eau en quittant l'aube;
$\mathcal{T}_m$ quantité de travail produite par seconde;
$\frac{1}{2}mV^2$ force vive que possède l'eau à son arrivée sur la roue;
$\frac{1}{2}m(V-2v)^2$ perte de force vive due à la vitesse que conserve l'eau,

$\mathcal{T}_m$ sera maximum quand la perte de force vive $\frac{1}{2} m(V - 2v)^2$ sera nulle, c'est-à-dire quand on aura $V = 2v$, ce qui donne

$$\mathcal{T}_m = \frac{1}{2} mV^2 = Ph. \qquad \text{(page 171.)}$$

Formule qui fait voir que le travail utile théorique est égal au travail dépensé, et double de celui produit par les roues à aubes planes (183).

Les formules précédentes ne peuvent être vraies qu'autant que l'eau ne produit pas de choc contre les aubes, c'est-à-dire qu'autant que toute l'eau arrive tangentiellement à ces aubes; ce qui est impossible dans la pratique, à cause de l'épaisseur de la lame fluide, quelle que soit du reste la forme des aubes. Il y a donc toujours choc, d'où il résulte une perte de force vive, qui a été négligée dans les formules. Jamais non plus l'eau ne reste sans vitesse après avoir quitté la roue. On a aussi négligé les pertes d'eau, ainsi que le frottement de l'eau et celui des tourillons.

Malgré toutes ces causes de diminution de l'effet utile, l'expérience prouve qu'avec de bonnes dispositions de roues on obtient

$T_m = 0{,}65Ph$ pour des chutes de $1^m{,}20$ et au-dessous.
$T_m = 0{,}60Ph$ id. $1^m{,}30$ à $1^m{,}50$.
$T_m = 0{,}55$ à $0{,}50Ph$ id. $1^m{,}80$ à $2^m{,}00$.

Sauf des circonstances particulières, il convient de n'employer ces roues que pour des chutes inférieures à $1^m{,}50$, et elles sont surtout avantageuses pour des chutes qui ne dépassent pas 1 mètre.

D'après les expériences de M. Poncelet, on doit avoir dans la pratique $v = 0{,}55V$.

La forme de l'aube peut être une courbe quelconque, pourvu qu'elle soit continue; le plus souvent c'est un arc de cercle. Dans tous les cas, elle doit être normale, ou à peu près, à la circonférence intérieure de la roue au point où elle la rencontre, et faire avec la circonférence extérieure un angle de 25 à 30°.

La vitesse de la roue étant environ moitié de celle d'arrivée de l'eau, il suffit, pour que celle-ci ne saute pas au-dessus des aubes quand la roue est en marche, que la distance entre les circonférences intérieure et extérieure de la roue soit le 1/4 de la hauteur de chute, plus l'épaisseur de la lame d'eau à son arrivée sur la roue; mais, pour éviter que l'eau ne jaillisse encore dans la roue, il convient de la faire égale au 1/3 de la chute, plus l'épaisseur de la lame fluide. (Consulter la règle page 177).

L'écartement des aubes à la circonférence extérieure de la roue varie de $0^m{,}25$ à $0^m{,}30$. Leur plus courte distance doit être moindre que la levée minimum de la vanne. Leur nombre doit être divisible par celui des bras.

La levée verticale de la vanne varie de $0^m{,}20$ à $0^m{,}30$, et on peut la porter à $0^m{,}40$ dans les cas de fortes dépenses d'eau et de petites longueurs de roues.

L'écartement intérieur des couronnes doit être de $0^m{,}06$ à $0^m{,}10$ plus grand que la largeur de l'orifice de la vanne.

Le fond du bief supérieur est à peu près horizontal ; on le raccorde avec le coursier, dont la pente varie entre 1/10 et 1/15, depuis la vanne jusqu'à son point de tangence avec la circonférence extérieure de la roue. A partir de ce point, le coursier est concentrique avec la roue jusqu'à une distance, en aval de la verticale passant par l'axe de la roue, comprise entre 1 fois et 1 fois 1/2 l'intervalle de deux aubes consécutives. Enfin le coursier se termine par un ressaut de $0^m,30$ à $0^m,40$ de profondeur, dont le sommet doit être au niveau des eaux moyennes dans le canal de fuite. La largeur du coursier, entre la vanne et la roue, est égale à celle de l'ouverture de la vanne ; la partie qui touche la roue est élargie de manière à envelopper les couronnes en laissant un centimètre de jeu de chaque côté. Le coursier doit conserver cette largeur jusqu'à une hauteur de $0^m,10$ au-dessus du point le plus élevé de l'ouverture de la vanne.

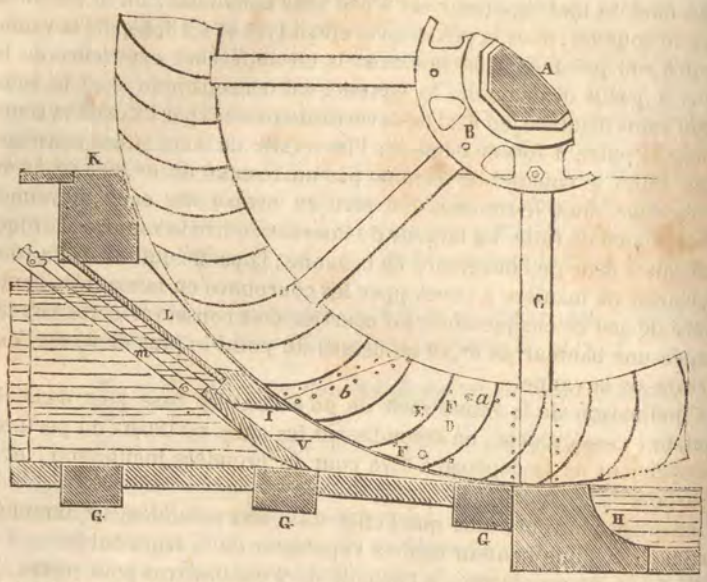
L'inclinaison de la vanne varie de un à deux de base pour deux de hauteur ; ce qui porte, en arrondissant les côtés verticaux du pertuis, le coefficient de la dépense à 0,74 pour la première inclinaison, et à 0,80 pour la seconde (146).

Les aubes peuvent, sans que l'effet utile soit sensiblement diminué, être noyées d'une hauteur égale à l'épaisseur de la lame fluide.

La figure 25 représente, à l'échelle de 2 centimètres pour mètre, la coupe d'une roue à la Poncelet, établie à Romilly par M. Ferry. Cette roue est de la force de 50 chevaux ; la chute est $1^m,30$, et la dépense $4^{m.c},810$ par seconde. Par suite de considérations locales, le diamètre a été fixé à $5^m,50$, la longueur à $6^m,04$, et, à l'exception des tourteaux qui fixent les bras à l'arbre, qui sont en fonte, on a cru devoir faire tout en bois, même les aubes.

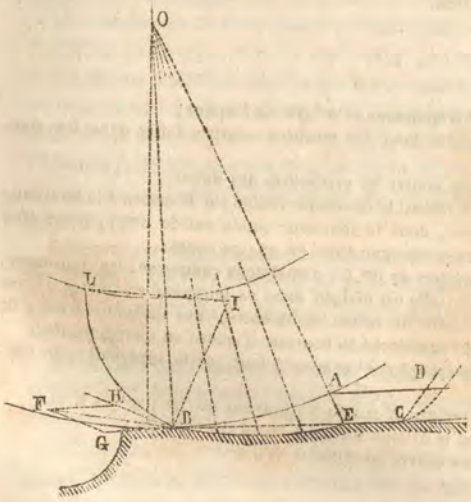
A arbre de la roue ;
B tourteaux en fonte ;
C bras, au nombre de 8 ;
D couronne en bois, de $0^m.10$ d'épaisseur et $0^m.66$ de hauteur ;
E aubes, dont les bouts entrent dans des rainures courbes faites dans les couronnes ;
F boulons serrant les couronnes contre les extrémités des aubes ;
*a* extrémités des boulons F qui relient la couronne visible sur le dessin à la couronne qui est cachée. Cette roue, dont la longueur totale est de $6^m04$, porte cinq couronnes qui la divisent en quelque sorte en quatre roues ;
*b* vis à bois réunissant les madriers de $0^m.05$ d'épaisseur composant les couronnes ;
V vanne ; de même que la roue, elle est divisée dans sa longueur en quatre parties qui reçoivent simultanément le même mouvement. Des cloisons formées de madriers en bois divisent également le coursier d'amont en quatre parties ;
*m* queues des vannes ; elles sont en fer, et armées à leur partie supérieures de crémaillères en fonte ;
L cloison en bois formant la retenue d'eau en s'appuyant sur les poutres K et I ;
G, G madriers en bois consolidant le dallage formant le sol du coursier ;
H ressaut formé par une bonne pierre de taille.

Fig. 25.




Les règles qui viennent d'être exposées servaient à l'établissement de ce genre de roues, lorsque M. Poncelet a proposé, pour éviter le choc de l'eau contre les aubes, de faire le coursier en spirale sur une partie de sa longueur. La figure 26 représente cette modification.

Fig. 26.




OA étant le rayon de la roue, on mène à la circonférence extérieure une tangente BC inclinée au 1/10 environ, qui représenterait le fond du coursier dans l'ancien tracé. On mène à cette tangente, à une distance égale à l'épaisseur de la lame fluide entre la vanne et la roue, une parallèle AD. On prolonge le rayon OA, et, à partir du point E, jusqu'à celui B, le coursier prend la forme d'une spirale, c'est-à-dire qu'il s'ap-

proche de la circonférence extérieure de la roue de quantités égales pour des angles égaux décrits autour du centre (*Int.*, 1140).

Avec cette disposition, les différents filets fluides de la veine, qui conserve à peu près une épaisseur uniforme entre la vanne et la roue, décriront des spirales semblables, et entreront tous dans la roue sous le même angle, c'est-à-dire sans choc, si le premier élément de l'aube est dirigé suivant cet angle.

Pour tracer l'aube, au point B on mène une tangente BF à la spirale (*Int.*, 1141); on prend, à une même échelle arbitraire, BF = 1 et, sur le prolongement de EB, BG = 0,55, vitesse normale de la roue, et BH, parallèle à GF, est la direction à donner au premier élément de l'aube. On mène BI perpendiculaire à BH, et d'un point I, pris sur cette perpendiculaire, traçant un arc qui fasse avec la circonférence intérieure de la couronne un angle aigu très-rapproché d'un droit, cet arc détermine la forme de l'aube.

Des expériences de M. Morin, sur une roue en fer et fonte à coursier spirale, de $2^m,80$ de diamètre, $0^m,80$ de longueur extérieure et $0^m,75$ de hauteur de couronnes; des chutes de $1^m,20$ à $1^m,30$ quand la roue était noyée, et de $0^m,90$ quand elle ne l'était pas, et des levées de vannes de $0^m,15$, $0^m,20$, $0^m,25$ et $0^m,277$, il résulte :

1° Que le nouveau tracé du coursier et des aubes indiqué par M. Poncelet diminue beaucoup, sinon détruit entièrement, le choc de l'eau contre les aubes, et en facilite l'admission et la circulation;

2° Qu'avec cette disposition, une exécution soignée et un moment d'inertie suffisant (101), la roue acquiert la propriété, qu'elle ne possédait pas auparavant, de pouvoir marcher à des vitesses notablement supérieures ou inférieures à celle qui correspond au maximum d'effet, sans que l'effet utile s'éloigne considérablement de ce maximum;

3° Que le rapport de l'effet utile au travail total dépensé par le moteur s'est élevé à 0.60 ou 0.62 pour une roue en bois de $3^m.20$ de diamètre et d'une puissance de 6 chevaux, mise en expérience, et que pour des roues plus puissantes il s'élèverait probablement à 0.65;

4° Que l'effet utile augmente avec la levée de la vanne, et que les levées de $0^m.20$, $0^m.25$ et même $0^m.35$ paraissent favorables avec le nouveau coursier, pourvu que les couronnes soient proportionnées de façon que la capacité offerte par la roue à l'admission du liquide, à la vitesse du maximum d'effet, soit au moins 1 fois 1/2 le volume débité par la vanne, et il convient généralement de la prendre égale à 2 fois, surtout quand la roue est exposée à être noyée;

5° Que la vitesse, mesurée à la circonférence extérieure de la roue, doit être égale aux 0.50 ou 0.55 de celle $\sqrt{2gh'}$ due à la charge $h'$ sur le sommet de l'orifice, et non sur le centre de l'orifice (146). La vitesse se calcule comme si le niveau de l'eau en aval de l'orifice s'élevait jusqu'à l'arête supérieure de cet orifice; ce qui a lieu jusqu'à un certain point, l'eau ne se dégageant pas librement;

6° Qu'à charges et levées égales de vannes, la roue rend un effet utile sensiblement le même quand elle est placée à $0^m.12$ au-dessus du niveau d'aval, ou quand elle est noyée de $0^m.20$ à $0^m25$; ce qui tient en partie à ce que sa surface extérieure n'offrait pas de parties en saillie. Le sommet du ressaut du coursier doit être placé au niveau moyen de l'eau dans le canal de fuite, toutes les fois qu'on n'aura pas à craindre des crues fréquentes et durables, et qu'on pourra donner au canal de

fuite, immédiatement auprès de la roue, une largeur égale à 5 ou 6 fois celle du coursier. Lorsque les localités forceront à ne donner au canal de fuite, près de la roue, qu'une largeur égale à celle du coursier, on fera un petit sacrifice sur la chute en plaçant le sommet du ressaut du coursier à $0^m.08$ ou $0^m.10$ au-dessus du niveau moyen des eaux d'aval. Dans ce dernier cas, la chute disponible, au lieu d'être la différence du niveau de l'eau dans le bief supérieur et dans le canal de fuite, comme dans le premier cas, est égale à la hauteur du niveau d'amont au-dessus du sommet du ressaut. Le ressaut doit avoir de $0^m.30$ à $0^m.40$ au moins, et plus s'il est possible de baisser le fond du canal de fuite;

7° Que quand la roue a été noyée de $0^m.357$ (moitié de la hauteur des couronnes), elle a encore rendu un effet utile égal aux 0,46 ou 0,47 du travail total dépensé, et qu'il y a lieu de penser qu'elle aurait encore marché convenablement si on avait pu la noyer davantage;

8° Que la vitesse de la roue à sa circonférence extérieure étant à celle d'arrivée de l'eau dans le rapport indiqué (5°), quel que soit le diamètre de la roue, il suffit, pour les cas ordinaires, c'est-à-dire pour les chutes de $0^m.90$, $1^m.20$ et $1^m.30$, d'établir entre la hauteur C des couronnes, mesurée suivant le rayon, et le diamètre D de la roue le rapport

$$\frac{C}{D} = 0{,}25.$$

*Application.* Soit à établir une roue à la Poncelet, pour une chute à peu près constante de $1^m,10$, et une dépense de 1200 litres par seconde.

Admettant 0,60 pour rapport du travail moteur à l'effet total dépensé, on a par seconde

$$T_m = 0{,}60Ph = 0{,}60 \times 1200 \times 1{,}10 = 792^{km}.$$

La force de la roue en chevaux est

$$\frac{792}{75} = 10{,}56 \text{ chevaux.}$$

Prenant la levée verticale de la vanne égale à $0^m,25$, la charge sur l'arête supérieure de l'orifice sera

$$h' = 1{,}10 - 0{,}25 = 0^m,85.$$

Supposant la vanne inclinée à un de base pour un de hauteur, ce qui donne 0,80 pour coefficient de la dépense, $l$ étant la dimension horizontale de l'orifice de la vanne, on a, puisque l'on peut placer, à cause de la constance du régime, le sommet du ressaut au niveau d'aval, et qu'il se trouve à peu près à la hauteur de l'arête inférieure de l'orifice de la vanne,

$$1{,}2 = 0{,}80 \times 0{,}25 \times l \times \sqrt{2 \times 9{,}8088 \times 0{,}85},$$

d'où

$$l = \frac{1{,}2}{0{,}80 \times 0{,}25 \times 4{,}083} = 1^m,47.$$

On prendra pour largeur de la roue, entre les couronnes, $L = 1^m,55$. La vitesse d'arrivée de l'eau sur la roue étant $4^m,083$, la vitesse de la circonférence extérieure de la roue sera

$$v = 0,55V = 0,55 \times 4,083 = 2^m,25.$$

La capacité annulaire comprise entre les deux couronnes est (*Int.*, 668)

$$\left(\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi (D - 2C)^2}{4}\right) L. \qquad (a)$$

Faisant dans cette expression $D = 4C$, elle devient

$$3\pi LC^2.$$

La partie de cette capacité qui passe devant la vanne en une seconde est

$$3\pi LC^2 \times \frac{v}{\pi D} = 3\pi LC^2 \times \frac{v}{4\pi C} = 0,75LCv. \qquad (b)$$

Faisant ce volume égal à deux fois la dépense de la vanne, on a

$$2 \times 1,2 = 0,75LCv, \quad \text{d'où} \quad C = \frac{2 \times 1,2}{0,75Lv}. \qquad (c)$$

Remplaçant les lettres par leurs valeurs relatives au cas qui nous occupe, on a

$$C = \frac{2 \times 1,2}{0,75 \times 1,55 \times 2,25} = 0^m,917,$$

et par suite

$$D = 0,917 \times 4 = 3^m,668.$$

On voit que cette règle conduit à des valeurs de C plus considérables que celles qu'on a employées jusqu'à présent (page 174); ce qui augmente la difficulté de construction de la roue; mais cela a l'avantage d'empêcher l'eau de jaillir dans la roue, non-seulement pendant la marche, mais aussi lors de la mise en train.

Il peut arriver que le diamètre de la roue soit fixé par des considérations locales. Supposons, par exemple, que la condition de tenir le niveau du sol de l'usine au-dessus du niveau des plus hautes eaux oblige de faire $D = 4^m,50$.

Pour avoir la valeur de C dans ce cas, on met, en effectuant les calculs, l'expression (*a*) sous la forme

$$\pi L(-C^2 + DC).$$

L'expression (*b*) devient

$$\pi L(-C^2 + DC) \times \frac{v}{\pi D} \quad \text{ou} \quad (-C^2 + DC) \times \frac{Lv}{D},$$

et l'équation (*c*),

$$(-C^2 + DC) \times \frac{Lv}{D} = 2 \times 1{,}2 \quad \text{ou} \quad C^2 - DC = -\frac{2 \times 1{,}2 \times D}{L \times v},$$

d'où (*Int.*, 488)

$$C = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{2 \times 1{,}2 \times D}{L \times v}}.$$

Remplaçant les lettres par leurs valeurs, on a pour le cas qui nous occupe

$$C = \frac{4{,}5}{2} - \sqrt{\frac{4{,}5^2}{4} - \frac{2 \times 1{,}2 \times 4{,}5}{1{,}55 \times 2{,}25}} = 0^m{,}85.$$

**135.** *Roues de côté* (fig. 27). Ces roues reçoivent l'eau un peu au-dessous de leur axe, et elles sont le plus exactement possible enveloppées d'un coursier circulaire sur toute la partie soumise à l'action de l'eau.

L'équilibre dynamique de ces roues donne, pour une seconde, en négligeant les pertes d'eau et le frottement des tourillons,

$$\mathcal{T}_m = Ph - \frac{P}{2g}(V^2 + v^2 - 2Vv\cos\alpha) - \frac{P}{2g}v^2 - t_r.$$

P poids total d'eau dépensé ;

$h$ chute totale ou différence du niveau de l'eau dans le bief supérieur et derrière la roue;

V vitesse moyenne du filet moyen au moment où il rencontre la roue ou l'eau qui se trouve déjà sur l'aube ;

$v$ vitesse de la roue et de l'eau à sa sortie des aubes ;

$\alpha$ angle que font entre elles les deux vitesses V et $v$ au point où le filet moyen rencontre la roue ou l'eau qui se trouve déjà sur l'aube ;

$(V^2 + v^2 - 2Vv\cos\alpha) = W^2$ ; W étant la résultante de la vitesse V et d'une vitesse égale et directement opposée à $v$, c'est-à-dire la vitesse relative de l'eau par rapport à la roue (*Int.*, 1356 et 1372); W est la perte de vitesse de l'eau. Les valeurs de V, $v$, $\alpha$ et W varient, pour tous les filets fluides et pour toutes les positions que prend l'aube par rapport aux positions de ces différents filets, depuis le point où l'auget admet chaque filet, jusqu'au point où il cesse de le recevoir; mais, afin de rendre possible l'évaluation des termes de la formule précédente, on supposera, dans la pratique, la veine fluide concentrée dans son filet moyen; on prendra V pour le point où le filet moyen rencontre la circonférence extérieure de la roue; $v$ sera la vitesse de la circonférence extérieure de la roue, et sera, pour la détermination de W, dirigée suivant la tangente à cette circonférence extérieure, au point où le filet moyen la rencontre. Du reste, à l'aide d'une épure représentant l'auget dans ses différentes positions et le niveau de l'eau qui s'y trouve, on déterminerait facilement, d'une manière approximative, pour V, $v$, $\alpha$ et W, des valeurs moyennes plus exactes que les valeurs que nous venons de supposer ;

$\mathcal{T}_m$ travail utile transmis par l'arbre de la roue ;

$Ph$ travail total dépensé ;

$\frac{P}{2g}(V^2 + v^2 - 2Vv\cos\alpha)$ perte de travail due aux réactions et au frottement de l'eau contre la roue ;

$\frac{P}{2g}v^2$ perte de travail due à la vitesse que conserve l'eau ;

$t_r$ perte de travail due au frottement de l'eau contre le coursier, et que, jusqu'à un certain point, on peut évaluer par la formule de Prony $RI = (av + bv^2)$, en considérant, dans ce cas, $v$ comme étant sensiblement la vitesse du fond et non la vitesse moyenne (160). Quand les roues marchent avec une faible vitesse, 1m.30 et au-dessous, on peut négliger $t_r$.

La valeur de $T_m$ peut être mise sous la forme

$$T_m = Ph - \frac{PV^2}{2g} + \frac{Pv}{g}(V\cos\alpha - v) - t_r.$$

Ce qui fait voir que, pour une même valeur de $Ph$, $T_m$ est d'autant plus grand que la vitesse V est plus petite. C'est afin de rendre V aussi petit que possible que l'on fait arriver l'eau sur la roue par une vanne en déversoir. Cette dernière formule fait voir aussi que $T_m$ est d'autant plus grand que le terme $\frac{Pv}{g}(V\cos\alpha - v)$ est plus grand ; ce qui a lieu, pour des valeurs déterminées de V et $v$, quand $\cos\alpha$ est maximum, c'est-à-dire égal à l'unité, et que par conséquent $\alpha = 0°$ ; c'est ce qu'on obtient pour les roues recevant l'eau tout à fait en dessous (183 et 184), ou ce qui aurait lieu dans une roue de côté, si l'on pouvait faire arriver l'eau tangentiellement à la roue. Les valeurs de V et de $\alpha$ étant déterminées, le terme $\frac{Pv}{g}(V\cos\alpha - v)$ est maximum quand on a $v = \frac{V\cos\alpha}{2}$ (mêmes considérations que celles qui donnent $v = \frac{V}{2}$, n° 183, page 170).

Dans la pratique, l'effet utile de ces roues est les 0,70 du travail total $Ph$ dépensé, quand les chutes approchent de 2m,50, et il n'est que les 0,50 de $Ph$ pour les chutes de 1m,20 ; de sorte qu'on peut considérer les 0,60 de $Ph$ comme étant l'effet utile moyen produit par ce genre de roues; mais par des dispositions favorables, cet effet utile peut être augmenté.

Les considérations exposées plus haut conduisent à donner à la roue une vitesse $v = \frac{V\cos\alpha}{2}$. Ordinairement on a dans la pratique $v = 0{,}45V$.

La vitesse convenable à ces roues est de 1m,30 par seconde ; elle ne doit être ni inférieure à 1 mètre ni supérieure à 2.

L'abaissement de la vanne au-dessous du niveau de l'eau dans le bief supérieur doit être assez fort, de 0m,20 à 0m,25.

Avec ces ouvertures, la perte d'eau entre les aubes et le coursier, qui dépend de la largeur de la roue, est faible relativement au débit total de la roue, et le choc de l'eau contre les aubes n'est pas considérable.

Quand, par suite des sécheresses, la dépense d'eau diminue considé-

rablement, il vaut mieux verser toute l'eau dans un seul compartiment de la roue en n'abaissant qu'une partie de la vanne, disposée à cet effet, que de la verser sur toute la roue en abaissant faiblement toute la vanne.

L'arête supérieure du col de cygne doit être placée à un niveau tel, que pendant les plus basses eaux toute l'eau que doit débiter la roue puisse passer par-dessus. La vanne doit être telle, que quand elle est fermée, son arête supérieure se trouve à $0^m,10$ ou $0^m,12$ au-dessus du niveau de l'eau, et d'autant au-dessous de la crête du col de cygne.

La direction de la vanne se prend perpendiculaire au rayon de la roue mené un peu au-dessus du filet moyen du déversoir, lequel se trouve aux 3/5 environ de la profondeur de l'orifice. La vanne verse ainsi l'eau le plus près possible de la roue, sans qu'elle puisse, dans aucune position, être rencontrée par les aubes.

Ordinairement les aubes sont planes et dirigées suivant le rayon; mais il convient, afin de diminuer le choc de l'eau, de diriger leur premier élément suivant la direction de la vitesse W, et de les faire courbes comme pour les roues à la Poncelet. C'est ce que l'on fait quand elles sont en tôle; mais quand elles sont en bois, on les compose de deux parties planes, l'une dirigée suivant la direction de W et égale à peu près aux 2/3 de la profondeur de l'auget; l'autre inclinée à 45° sur le rayon, et raccordant la première avec la fonçure de la roue.

Les aubes sont en planches de chêne, et plus souvent d'orme, de $0^m,025$ d'épaisseur, lavées à la scie seulement, à l'exception du bord extérieur que l'on dresse et que l'on fait un peu en biseau, afin de laisser le moins de jeu possible entre les aubes et le coursier. Ce jeu ne doit pas dépasser 2 à 3 millimètres.

Le centre de la roue doit toujours être placé au-dessus du niveau de l'eau dans le bief supérieur, et, s'il est possible, à $0^m,50$ au-dessus de ce niveau. Avec cette précaution, la partie extérieure de l'aube peut être dirigée suivant le rayon de la roue, ce qui facilite la construction.

La capacité de l'aubage doit être à moitié remplie par l'eau, et ne doit jamais l'être à plus des deux tiers, quand le volume à débiter est constant. Dans tous les cas, cette capacité doit être suffisante pour débiter les plus grandes eaux.

On fait la longueur des aubes égale à la largeur de la vanne, et on ménage dans la fonçure de la roue des petits espaces libres pour le dégagement et l'entrée de l'air quand l'eau entre dans l'aubage ou qu'elle en sort.

L'espacement des aubes peut varier de $0^m,33$ à $0^m,40$.

Il convient, d'après M. Belanger, pour utiliser le mieux possible la chute, de faire plonger les aubes dans l'eau d'aval de toute l'épaisseur de la lame admise entre elles; de supprimer le ressaut brusque que l'on

était dans l'habitude de faire ; mais de prolonger le fond du coursier circulaire par un plan incliné au 1/12 environ, jusqu'à une distance de 3 ou 4 mètres de l'aplomb de la roue. Ce plan incliné conserve à l'eau la vitesse de la roue jusqu'à ce qu'elle quitte celle-ci ; et, en vertu de cette vitesse acquise, l'eau vient même refouler celle d'aval de manière à en débarrasser la roue, qui peut alors plonger, quand elle est au repos, d'une épaisseur supérieure à celle de la lame admise entre les aubes. Les joues latérales du coursier se prolongent en aval par des plans verticaux qui s'étendent jusqu'à l'extrémité du plan incliné, et on les élève à un niveau supérieur à celui des plus grandes eaux d'aval qui permet encore de marcher.

Les expériences suivantes, faites par M. Morin, sur une roue de la poudrerie du Bouchet, confirment les avantages des dispositions conseillées par M. Belanger. Cette roue a 4 mètres de diamètre, le plan incliné au 1/12 se prolonge jusqu'à $3^{m},50$ environ en aval de la roue, et la capacité de l'auget est environ $0^{m.c.},228$. M. Morin, en abaissant la vanne à différentes hauteurs, de manière à faire varier les dépenses d'eau et les vitesses, a observé à quelle distance horizontale en aval de l'axe de la roue se produisait le remous ; dans tous les cas, l'eau entrait très-bien dans la roue.

| ABAISSEMENT de la vanne. | VITESSE de la circonférence extérieure de la roue. | HAUTEUR dont la roue est noyée au repos. | ÉPAISSEUR de la lame d'eau dans l'auget du bas. | DISTANCE horizontale à laquelle se forme le remous. | RAPPORT du volume d'eau admis à la capacité des augets. |
|---|---|---|---|---|---|
| m. | m. | m. | m. | m. | |
| 0.20 | 2.235 | 0.35 | 0.12 | plus de 2.00 | $\frac{1}{3.44}$ |
| 0.22 | 1.860 | *id.* | 0.12 | 1.45 | $\frac{1}{3.47}$ |
| 0.24 | 2.140 | *id.* | 0.11 | 2.00 | $\frac{1}{3.5}$ |
| 0.31 | 3.350 | *id.* | 0.11 | 2.50 | $\frac{1}{3.73}$ |

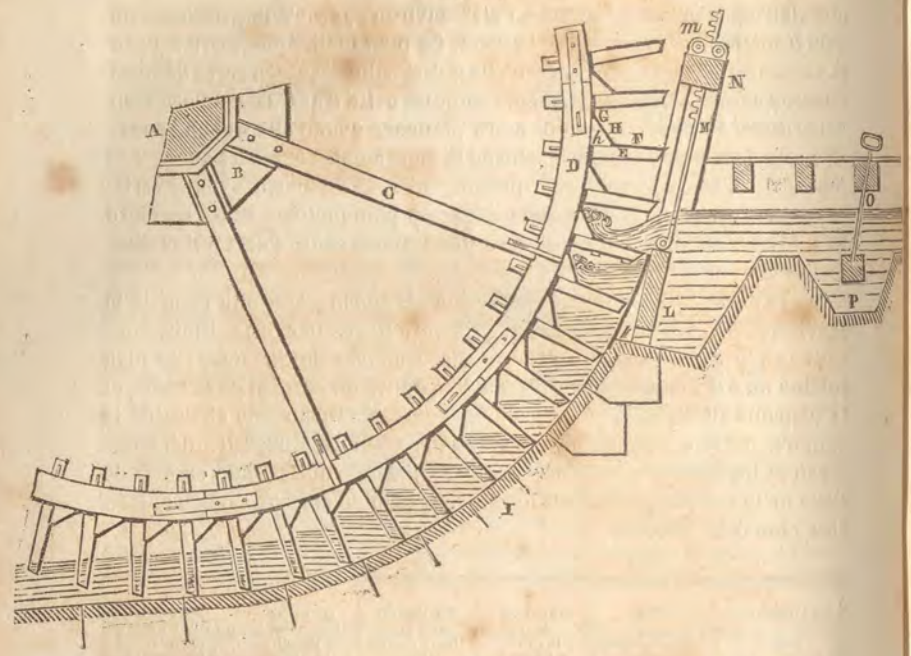
Le diamètre de ces roues ne peut guère avoir moins de 4 mètres.

Les roues de 4 mètres peuvent n'avoir que six bras par couronne ; celles de 5 à 7 mètres en ont 8.

Les chutes auxquelles on peut appliquer ce genre de roues avec avantage ne peuvent être supérieures à $2^{m},50$ ni inférieures à $1^{m},20$.

La figure 27 représente, à l'échelle de 2 centimètres pour mètre, la coupe verticale perpendiculaire à l'axe d'une roue de côté. La chute est de $2^{m},475$, et la dépense, de 1200 litres par seconde (Extrait de la publication industrielle de M. Armengaud).

Fig. 27.




A arbre de la roue;
B tourteaux en fonte servant à fixer les bras à l'arbre;
C bras boulonnés sur les tourteaux et assemblés à tenons et mortaises dans les couronnes;
D couronnes en bois de chêne formées de plusieurs segments assemblés entre eux par des languettes et des équerres en fer;
E coyaux ou bracons en chêne ajustés dans les couronnes et retenus par des clefs en bois fortement serrées;
F aubes en bois d'orme ordinairement, ou de chêne; elles sont boulonnées sur les coyaux;
G contre-aubes cylindriques clouées sur la circonférence extérieure des couronnes;
H contre-aubes planes inclinées s'appuyant sur les aubes et les contre-aubes, et clouées sur des tasseaux *h*;
I coursier en pierre de taille, ou en briques, ou en bois de chêne; il s'élève latéralement sur toute la partie soumise à l'action de l'eau; au-dessus de cette limite, il est surmonté d'un côté par le mur de l'usine, appelé mur de *tampanne*, et de l'autre, par un mur qui supporte le palier de la roue, et que l'on appelle mur d'*éperon*;
*k* plaque de fonte, appelée *col de cygne*, formant le sommet du coursier et destinée à rapprocher le plus possible la vanne de la roue;
L vanne plongeante en bois de chêne;
M crémaillère servant à manœuvrer la vanne;
*m* pignon s'engrenant avec la crémaillère M;

N chapeau en bois supportant toute la transmission de mouvement de la vanne; il est assemblé à ses extrémités sur deux poteaux en bois portant des rainures dans lesquelles glisse la vanne. Les parties frottantes de la vanne et de ces rainures sont garnies de bandes de fer plates, afin de diminuer le frottement;

O barreaux en fer méplat de $0^m.06$ de large sur $0^m.007$ d'épaisseur, espacés de $0^m.08$ à $0^m.09$, de manière à former une grille en forme d'éperon qui règne sur toute la largeur du canal. Cette grille est destinée à arrêter les corps flottants qui pourraient détériorer la roue. Les barreaux O portent un anneau à leur partie supérieure, afin qu'on puisse les retirer facilement quand on veut enlever les immondices;

P espace où s'accumulent les corps lourds, qui sans cela viendraient s'amonceler derrière la vanne plongeante et empêcher sa manœuvre. Malgré cette précaution, il faut encore laisser derrière cette vanne un espace libre, dont les dimensions permettent un nettoyage facile.

Dans le mur d'éperon, à l'extrémité de la fosse P, se trouve une vanne dont la crête règle le niveau supérieur des eaux, et qui descend jusqu'au fond de cette fosse, de sorte qu'en la levant, après avoir fermé la vanne plongeante L, les eaux entraînent les immondices accumulés dans la fosse P. C'est à cet instant qu'il convient de pouvoir enlever les barreaux O.

On construit encore des roues de côté dont la vanne est disposée avec charge sur le sommet; mais on ne doit employer cette disposition que quand la vitesse $v$ de la roue est ou peut devenir trop grande pour que l'on puisse obtenir une vitesse V convenable au moyen d'un déversoir. Il peut arriver aussi que le niveau de l'eau dans le bief supérieur soit trop variable, ou que le fond du lit soit trop mobile pour pouvoir établir une vanne plongeante. Ces roues mixtes rendent un effet utile d'autant moindre, que la vanne est placée plus bas par rapport à la chute totale; cet effet est les 0,40 environ du travail total dépensé pour des vitesses de roues approchant de 3 mètres; si, au contraire, la vitesse de la roue n'est que de $1^m,50$, ce qui permet de baisser un peu moins la vanne, l'effet utile peut atteindre les 0,50 du travail total dépensé.

**186.** La machine à vapeur de Chaillot élève l'eau dans des bassins étagés à des niveaux différents. M. Mary a utilisé la chute de l'eau d'un des bassins dans l'autre pour faire mouvoir une roue hydraulique qui élève, à l'aide de pompes, une portion de l'eau dans un petit réservoir placé à un niveau convenable pour alimenter les quartiers élevés de Chaillot et du Roule.

La roue de M. Mary est une roue de côté, mais d'une construction particulière. Elle est formée de six aubes à peu près circulaires, de $0^m,30$ de diamètre, adaptées au pourtour d'un cylindre en fonte de $0^m,11$ de longueur et $1^m,20$ de rayon, formé par une couronne, et deux disques annulaires plans de $0^m,30$ de largeur, perpendiculaires à l'axe, et auxquels sont assujettis les six bras à fortes nervures de la roue. Pour séparer les eaux d'amont de celles d'aval, deux plaques en fonte, noyées en partie dans la maçonnerie, viennent s'appuyer sur les disques de la couronne, et forment, dans leur partie inférieure, les lèvres

d'un coursier annulaire en ciment de Vassy, calibré avec les aubes elles-mêmes, qui s'y emboîtent ainsi très-exactement. Ce coursier doit se prolonger au delà du plan vertical contenant l'axe de la roue sur une longueur égale à la moitié de l'intervalle des aubes, et se terminer au niveau des eaux d'aval; du côté d'amont, il s'évase en entonnoir pour faciliter l'entrée de l'eau qui en couvre ainsi l'orifice, et y pénètre comme elle le ferait dans une conduite placée au fond d'un réservoir. Il résulte de cette disposition que l'eau de la retenue agit sur les palettes comme elle agirait sur un piston.

La roue ne perd à peu près rien de son effet utile quand l'eau s'élève en amont jusqu'au point de surmonter le cylindre sur lequel sont fixées les aubes.

La vitesse de la roue ne doit pas excéder $1^m,30$ par seconde.

Il paraîtrait que des expériences au frein auraient donné 75 à 85 pour cent d'effet utile; mais ces nombres paraissent exagérés.

M. Mary a fait construire une roue semblable à la prise d'eau de la Villette, pour fouler l'eau à Montmartre. Il y a six palettes portées par un cylindre de $0^m,57$ de longueur et 1 mètre de rayon; elles sont rectangulaires, arrondies aux angles, et ont $1^m,80$, sur $0^m,75$ suivant le rayon; elles sont formées d'une forte plaque de tôle sous laquelle est fixé un fort madrier en bois dont la forme imite jusqu'à un certain point celle de la proue d'un bateau. Malgré cette précaution, les aubes font tellement jaillir l'eau en y pénétrant, que le rendement en est considérablement diminué.

Cette roue, qu'il ne peut être convenable d'employer que quand la variation de niveau est considérable, n'est applicable qu'à un débit d'eau constant. Du reste, malgré les perfectionnements dont elle est susceptible, son prix élevé et sa difficulté d'exécution ne lui permettent guère de devenir un moteur applicable à l'industrie. Un avantage de cette roue, c'est qu'elle est un compteur assez exact.

**187.** *Roues à augets* (fig. 31, page 195). L'équilibre dynamique de ces roues a la même expression que pour les roues de côté (185). Ainsi on a, pour une seconde, en négligeant les pertes d'eau, le frottement contre le coursier, quand il y en a un, et le frottement de l'axe de la roue,

$$T_m = Ph - \frac{P}{2g}(V^2 + v^2 - 2Vv\cos\alpha) - \frac{P}{2g}v^2.$$

Les mêmes lettres ont les mêmes significations qu'au n° 185.

La formule précédente peut être mise sous la forme

$$T_m = Ph - \frac{PV^2}{2g} + \frac{Pv}{g}(V\cos\alpha - v);$$

d'où l'on conclut, comme pour les roues de côté, que l'effet utile $T_m$

augmente à mesure que $\frac{PV^2}{2g}$ diminue et que le terme $\frac{Pv}{g}(V\cos\alpha - v)$ augmente ; or, pour un même poids d'eau P, $\frac{PV^2}{2g}$ dépendant de la vitesse V, il faudra par conséquent rendre cette vitesse aussi petite que possible. Le terme $\frac{Pv}{g}(V\cos\alpha - v)$ sera maximum quand, pour des valeurs déterminées de V et $v$, $\alpha$ sera nul ; cet angle est toujours très-faible pour les roues recevant l'eau près du sommet. On voit aussi que, pour des valeurs déterminées de V et de $\alpha$, le terme précédent sera maximum quand on aura $v = \frac{V\cos\alpha}{2}$, d'où, en supposant $\cos\alpha = 1$, $v = \frac{V}{2}$. Dans la pratique, la valeur de $v$ peut varier des 0,30 aux 0,80 de V sans que l'effet utile soit sensiblement altéré ; cependant, pour les petites roues, il convient de tenir $v$ entre les 0,40 et 0,60 de V. Cette propriété des roues à augets, de permettre une aussi grande variation de vitesse de rotation, les rend précieuses dans un grand nombre de circonstances, comme, par exemple, pour les marteaux, où non-seulement la vitesse est grande, mais aussi doit varier à chaque instant entre des limites très-éloignées.

La vitesse des roues à augets ne doit pas être inférieure à 1 mètre pour que leur marche soit régulière, et elle peut atteindre 2 mètres pour les petites roues, et $2^m,50$ pour les grandes, sans que l'effet utile soit sensiblement altéré. Pour les roues de marteaux, dont l'arbre porte la bague à cames, la vitesse atteint quelquefois 4 et 5 mètres, quoique leur diamètre ne soit que de 3 à 4 mètres ; mais alors l'effet utile est diminué.

Les augets commençant à verser leur eau avant d'être arrivés au point le plus bas de la roue, il en résulte une perte d'effet utile d'autant plus forte que la hauteur de versement et la quantité d'eau versée sont plus grandes, et que par conséquent le diamètre et la vitesse de la roue sont plus grands. C'est afin d'éviter ce versement que l'on enveloppe quelquefois la roue d'un coursier, depuis le point où commence le versement jusqu'à celui où les augets sortent de l'eau.

*Versement des augets.* L'action réciproque de la pesanteur et de la force centrifuge fait que la surface du liquide contenu dans l'auget prend une forme cylindrique à section circulaire, dont le centre O est, d'après M. Poncelet, situé sur la verticale passant par l'axe de la roue, à une distance au-dessus de cet axe égale à

$$\frac{g}{\omega^2}$$

$g = 9^m.8088$ accélération de vitesse due à la pesanteur ;

$\omega$ vitesse angulaire (100); elle est égale au quotient de la vitesse d'un point quelconque de la roue par la distance de ce point à l'axe, d'où l'on voit que la distance $\frac{g}{\omega^2}$ est indépendante du rayon de la roue.

Le centre commun O des courbes affectées par la surface du liquide contenu dans un auget étant connu, ainsi que la quantité d'eau contenue dans l'auget, il sera facile, à l'aide d'une épure, de déterminer le point où l'auget commencera à verser, puisqu'en ce point il devra encore contenir tout le fluide, et que la surface de celui-ci, qui a pour centre le point O, devra passer par l'arête extérieure de l'auget. A partir du point où l'auget commence à verser, la surface de l'eau passant toujours par l'arête extérieure de l'auget, il est facile de déterminer la quantité de liquide contenu dans l'auget en une position quelconque, et par suite la quantité de fluide perdue dans le passage de l'auget d'une position à une autre. Divisant alors la hauteur verticale $h'$, du point où commence le versement au-dessus du niveau de l'eau derrière la roue, en un certain nombre pair de parties égales, 6 par exemple, et déterminant les quantités de liquide $q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$, perdues par l'auget quand il arrive successivement : au point où commence le versement, au 1er, 2e, 3e, 4e, 5e points de division de $h'$ et au bas de $h'$, la perte de travail $t_p$ due au versement du liquide est, en appliquant la formule de Thomas Simpson (*Int.*, 1178),

$$t_p = \frac{h'}{6 \times 3} [q_0 + q_6 + 4(q_1 + q_3 + q_5) + 2(q_2 + q_4)].$$

Il est à remarquer que l'on aura $q_0 = 0$, puisque $q_0$ correspond au point où commence le versement; $q_6$, $q_5$ et souvent $q_4$ seront égaux chacun au poids total de l'eau que reçoit l'auget en passant devant la vanne, l'auget étant vide quand il arrive aux points de division de $h'$ correspondant à ces quantités.

Supposant qu'il passe $n$ augets par seconde devant la vanne, la perte de travail par seconde due au versement sera $nt_p$.

*Effet utile.* Une roue à augets bien disposée, enveloppée d'un coursier et marchant à une faible vitesse, rend quelquefois un effet utile $T_m = 0{,}80Ph$; mais avec les dispositions ordinairement usitées dans la pratique, la vitesse étant comprise entre 1 mètre et 2 mètres, et les augets remplis à moitié, cet effet utile est généralement compris entre 0,70 et 0,75P$h$, que les roues soient libres ou à coursier. Pour des vitesses plus grandes et des augets remplis au delà des 2/3 de leur capacité, cet effet descend jusqu'à 0,60P$h$, surtout pour les roues sans coursier. Enfin, pour les petites roues de marteaux marchant à grande vitesse, cet effet n'est quelquefois que de 0,37P$h$; ce faible rendement d'effet utile est dû à ce que l'eau tombant avec impétuosité sur la roue, qui marche très-vite, elle rejaillit hors de la roue, ou est emportée hors

des augets par la force centrifuge ; c'est surtout dans ce cas que le coursier produit une augmentation sensible d'effet utile.

*Augets.* La capacité des augets est les 3/4 de celle de la couronne, et comme ils ne doivent être que moitié pleins, l'eau n'occupe donc que les 3/8 de la couronne.

On a

$$Q = kelV, \quad \text{d'où} \quad l = \frac{Q}{keV}.$$

Q volume d'eau dépensé par seconde ;
$k$ coefficient de la dépense (140) ;
$e$ levée de la vanne ;
$l$ longueur de l'ouverture de la vanne ;
V vitesse d'écoulement de l'eau.

Pour que l'air se dégage facilement des augets, on fait leur longueur, c'est-à-dire la distance des couronnes, égale à $l$ augmentée de $0^m,10$ ou $0^m,12$ ; on doit avoir alors (pages 179 et 180),

$$Q = \frac{3}{8}\left(\frac{\pi D^2}{4} - \frac{\pi(D-2C)^2}{4}\right) L \times \frac{v}{\pi D}, \quad \text{d'où} \quad C = \frac{D}{2} - \sqrt{\frac{D^2}{4} - \frac{8}{3}\frac{DQ}{Lv}}.$$

D diamètre extérieur de la roue ;
C hauteur des augets, mesurée suivant le rayon ; elle ne doit jamais dépasser $0^m,40$ ; on la fait ordinairement égale à $0^m,30$ ou $0^m,35$, et il vaudrait mieux ne lui donner que de $0^m,25$ à $0^m,28$, afin de faire agir l'eau sur la plus grande hauteur possible, et de diminuer sa vitesse relative W à son entrée dans la roue ;
$v$ vitesse de la circonférence extérieure de la roue ;
$L = l + 0^m,10$ ou $0^m,12$, longueur des augets, mesurée entre les couronnes.

Avec une vitesse de $1^m,30$ à $1^m,40$, une roue à augets dépense convenablement de 70 à 100 litres d'eau par seconde et par mètre de longueur de roue.

La levée verticale de la vanne dépasse rarement $0^m,10$ à $0^m,12$ ; elle est souvent de $0^m,04$ à $0^m,05$ et quelquefois moins ; cette faible épaisseur de la veine fluide rend facile son introduction dans les augets.

L'ouverture des augets, c'est-à-dire la plus petite distance de deux aubes consécutives, est égale, non compris l'épaisseur du bois qui est de $0^m,03$ environ, à l'épaisseur de la veine fluide augmentée de $0^m,01$. La distance des aubes, mesurée suivant la circonférence extérieure de la roue, varie de $0^m,30$ à $0^m,40$ ; elle est ordinairement égale à la hauteur des couronnes. De cet écartement et du diamètre de la roue, on déduit le nombre des aubes, qui doit toujours être divisible par celui des bras ; l'espace compris entre deux bras doit contenir un nombre entier d'augets.

Fig. 28.



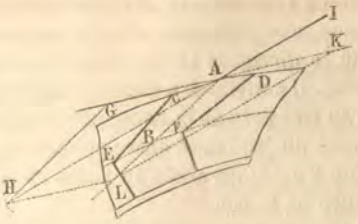

La forme des augets est variable; mais le plus souvent son aube se compose de deux parties, dont l'une AB est dirigée suivant le rayon de la roue et égale à la moitié de la hauteur AC de la couronne, et dont l'autre BD joint le point B à l'extrémité D du rayon passant par le fond de l'auget suivant.

M. d'Aubuisson fait le fond EF égal au 1/3 de ED, qui est ordinairement égal à $0^m,30$, et il mène FG faisant l'angle GFE de 110° à 118° suivant que les roues ont de 4 mètres à 12 mètres de diamètre; l'angle que fait GF avec la tangente à la circonférence extérieure au point G est de 31°, et il ne doit jamais dépasser 33°. On obtient cette disposition dans la pratique, en prenant simplement GH égal à $0^m,04$ ou $0^m,05$, quand, comme le conseille M. d'Aubuisson, on a eu soin de prendre la distance IF égale à $0^m,32$ environ. Dans tous les cas, la plus petite distance IK de deux aubes consécutives, non compris l'épaisseur des aubes, doit être au moins égale à l'épaisseur de la lame fluide augmentée de $0^m,01$. M. d'Aubuisson conseille de ne pas donner à IK moins de $0^m,11$ à $0^m,12$.

Quelquefois la partie extérieure de l'aube est brisée comme l'indique la forme LMNP; l'angle LPN varie de 50° à 60°, et celui que fait LM avec la tangente à la circonférence extérieure au point L, de 25° à 30°. On prend PN égal à la moitié de PQ, et PR compris ordinairement entre les 3/4 et les 5/6 de PQ. Cette forme a l'avantage de donner plus de capacité à l'auget, et de diminuer le choc de l'eau ainsi que la hauteur de déversement; mais la construction en est plus difficile.

La forme d'une courbe continue ST, dont l'élément extérieur fait un angle très-faible avec la tangente à la circonférence extérieure au point S, est celle que l'on doit préférer, soit pour diminuer les réactions de l'eau, soit pour augmenter la capacité des augets, soit aussi pour leur faire conserver l'eau sur la plus grande hauteur de chute possible; c'est la disposition adoptée pour les aubes en tôle, mais elle est presque impraticable pour les aubes en bois.

Fig. 29.



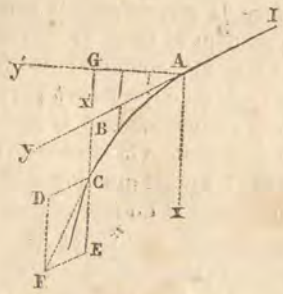

*Direction du filet moyen.* La forme de l'auget étant déterminée, il faut donner à la lame fluide une direction telle, que les différents filets qui la composent pénètrent dans l'auget en choquant le moins possible les deux faces de la partie extérieure de l'aube. Dans la pratique, on déterminera la direction à donner au filet moyen de la lame fluide qui rencontre la circonférence extérieure de la roue au point A (*fig.* 29), en menant la ligne AB qui divise en deux parties égales les deux arcs CD et EF, compris entre les parties extérieures des deux aubes consécutives; puis, prenant à partir du point A, sur la tangente à la circonférence extérieure de la roue, une distance AG représentant à une échelle quelconque la vitesse de la roue, si par le point G on mène GH parallèle à AB, et que du point A comme centre, avec un rayon AH égal à la vitesse V du filet moyen à son arrivée sur la roue, on décrive un arc de cercle qui coupe GH au point H, la ligne HA prolongée en AI représentera la direction à donner au filet moyen à son arrivée sur la roue. En effet, si l'on détermine la vitesse relative W en prenant la résultante de la vitesse AH = V et de AK qui est égale et directement opposée à AG = $v$ (page 180), cette résultante sera représentée en grandeur et en direction par AL; ce qu'il fallait obtenir pour que les différents filets composant la veine fluide choquassent le moins possible les deux faces de l'aube pendant tout le temps de leur introduction dans l'auget.

Si l'eau a la même vitesse moyenne dans toute la longueur du coursier d'arrivée, l'épaisseur de la lame y est uniforme, ce que l'on peut généralement supposer dans le cas des roues à augets, et le fond du coursier est parallèle au filet moyen, c'est-à-dire à AI. Comme on a la vitesse de l'eau dans le coursier, ainsi que le débit et la section du coursier, on en conclut la profondeur de la lame fluide et par suite la position du fond du coursier, que l'on place à une distance du filet moyen égale à la demi-épaisseur de la lame. Si le coursier était trop incliné pour que la vitesse de l'eau fût la même sur toute sa longueur, on déterminerait la vitesse à son origine et à son extrémité à l'aide des formules du n° 155; de ces vitesses on conclurait les épaisseurs de la lame fluide, et par suite la position du fond du coursier par rapport à celle du filet moyen.

Dans la construction précédente, on a déterminé la direction à donner au filet moyen en supposant qu'il se mouvait, après avoir quitté le coursier, dans la direction qu'il possédait avant, ce qui n'a pas lieu; car, outre le dénivellement qui existe à l'extrémité du coursier et qui

fait baisser un peu la direction du filet moyen, la pesanteur le fait descendre dès qu'il a quitté l'extrémité du coursier, et lui fait décrire, comme à un corps lancé dans l'espace, une parabole, dont la tangente en un point quelconque représente la direction de la vitesse du filet moyen en ce point (*Int.*, 1125 et 1359). Il conviendra donc, dans le cas où le coursier ne versera pas son eau très-près de la roue, soit à cause de l'épaisseur de son fond, soit à cause du jeu laissé entre ce fond et la roue, de prendre pour AI la tangente à cette parabole au point où elle rencontre la circonférence extérieure de la roue.

Fig. 30.




On tracera la courbe décrite par le filet fluide, à partir du point A situé en amont de l'extrémité du coursier, à une distance environ égale à l'épaisseur de la lame fluide, en considérant qu'à partir de ce point il est soumis à une vitesse initiale constante V, qui lui a fait parcourir suivant le prolongement de IA, après un temps $t$, une distance $AB = y = Vt$ (6), et à l'action de la pesanteur, qui lui a communiqué, après le même temps $t$, une vitesse verticale égale à $gt$, et lui a fait parcourir un espace vertical $BC = x = 1/2\, gt^2$ (18). En donnant à $t$ différentes valeurs, et déterminant les valeurs correspondantes de $y$ et de $x$, on a la position du filet moyen après un temps quelconque, ce qui permet de tracer par points la courbe qu'il décrit.

Le filet moyen possède, après le temps $t$, c'est-à-dire quand il est arrivé au point C, une vitesse $CD = V$ parallèle à AB, et une vitesse verticale $CE = gt$; formant alors le parallélogramme DCEF, la diagonale CF, qui sera tangente à la courbe, représentera en grandeur et en direction la vitesse réelle du filet moyen au point C; d'où l'on voit qu'avec une épure, il est facile de déterminer non-seulement la direction du filet fluide au moment où il choque un point quelconque de l'aube ou de l'eau qui se trouve dans l'auget, mais aussi l'intensité de la vitesse qu'il possède en ce point.

Des valeurs précédentes de $y$ et de $x$ on conclut

$$y^2 = \frac{2V^2}{g}\, x,$$

ou, en faisant $V^2 = 2gh$,

$$y^2 = 4hx.$$

D'où l'on peut conclure, comme pour un corps lancé dans l'espace sous une direction quelconque, que le filet fluide décrit, en négligeant aussi la résistance de l'air, une parabole dont le paramètre est égal à 4 fois la hauteur $h$ due à la vitesse initiale (*Int.*, 1111).

Si au lieu de prendre pour axe des $y$ la direction initiale AB, on prend l'horizontale AG, on a, en désignant l'angle GAB par $\alpha$,

$$x' = y' \operatorname{tang} \alpha + \frac{g}{2V^2 \cos^2 \alpha} y'^2,$$

et dans le cas où $\alpha$ serait nul, on aurait

$$x' = \frac{g}{2V^2} y'^2, \quad \text{d'où} \quad y'^2 = \frac{2V^2}{g} x' = 4hx'.$$

Même équation que dans le cas précédent.

*Vannage.* Il se fait de deux manières, suivant que la roue prend l'eau au-dessus de son sommet, ou à une certaine hauteur au-dessous. Dans le premier cas, si le niveau de l'eau est tout à fait constant, on établit le point supérieur de la roue à $0^m,20$ au-dessous de ce niveau, et à l'aide d'un coursier, dont le fond est en fonte, afin de lui donner le moins d'épaisseur possible, on amène l'eau sur la roue. Le fond du coursier se prolonge jusqu'à environ $0^m,40$ en aval du diamètre vertical de la roue, et il convient, pour empêcher l'eau de rejaillir latéralement, de prolonger encore ses parois verticales sur une étendue d'environ trois augets. On incline le fond du coursier d'après les considérations indiquées page 191 (*direction du filet moyen*), en ne le séparant de la roue que de $0^m,01$; par là, l'eau arrive sur la roue avec une faible vitesse, plus grande encore que celle de la roue, et si on ne donne à la couronne que de $0^m,25$ à $0^m,28$ de hauteur suivant le rayon de la roue, ce qui diminue la profondeur de l'auget et par suite la vitesse d'arrivée de l'eau contre le fond de cet auget tout en augmentant la hauteur d'action de l'eau sur la roue, on se trouvera dans les meilleures conditions sous le rapport de l'effet utile rendu par la roue. Lorsque le niveau de l'eau est variable, on établit le seuil de la vanne assez bas pour que, pendant les plus basses eaux, le débit soit encore suffisant pour la marche de régime de la roue. Le coursier ne doit pas avoir, si cela est possible, plus de 1 mètre ou $1^m,50$ depuis la vanne, avec une inclinaison de 1/12 au plus.

Lorsque le niveau sera inférieur, pendant un certain temps de l'année et d'une certaine quantité, au niveau le plus bas pour lequel la roue peut être établie, il conviendra, malgré la plus grande perte de chute due à l'introduction de l'eau dans les augets, et la plus grande hauteur de déversement de ces augets, hauteur qui croît avec le diamètre de la roue, de faire arriver l'eau à une certaine distance au-dessous du sommet de la roue, du côté d'amont. Dans ce cas, la vanne devra encore être établie pour pouvoir alimenter convenablement la roue pendant les plus basses eaux. Le point supérieur de la roue se place de manière que la vanne ne soit pas trop inclinée, sans cependant prendre un diamètre de

roue trop grand; pour des roues d'un diamètre moyen, il convient de le placer à 1m,15 environ au-dessus du niveau supérieur des plus grandes eaux. Pour les constructions soignées, on emploie, dans ce cas, pour distribuer l'eau sur la roue, le vannage en fonte (*fig.* 20) (156), dont la direction du filet moyen de chaque veine fluide partielle se détermine comme il a été indiqué page 191, en prenant pour V la vitesse la plus générale dans chaque orifice. Ordinairement, la vanne ne peut que plonger, et les orifices inférieurs ne s'ouvrent qu'après ceux du haut; mais, en disposant la vanne de manière qu'on puisse l'élever et l'abaisser à volonté au-dessus et au-dessous des orifices, et en plaçant les orifices supérieurs pour les plus grandes eaux et les orifices inférieurs pour les plus basses, on diminuera considérablement les irrégularités de la vitesse d'arrivée de l'eau sur la roue.

Dans les constructions moins soignées, tous les orifices du vannage précédent sont remplacés par un seul, dont les parois sont en bois, et qui doit encore produire un débit convenable pendant les plus basses eaux.

*Position des roues à augets par rapport au niveau d'aval.* Les roues recevant l'eau en dessus tournant en sens contraire du mouvement de l'eau dans le canal de fuite, elles ne doivent jamais être établies au-dessous du niveau supérieur de l'eau dans ce canal. Au contraire, les roues recevant l'eau en dessous du sommet marchant dans le sens de l'eau dans le canal d'aval, elles peuvent sans inconvénient être noyées de la 1/2 hauteur de la couronne, et elles le seront même avec avantage, si elles sont emboîtées d'un coursier circulaire qui empêche le déversement de l'eau. Cette propriété des roues à augets recevant l'eau de côté, de permettre au niveau d'aval de varier dans des limites assez étendues, sans que l'effet utile soit sensiblement altéré, les rend très-souvent préférables aux roues recevant l'eau en dessus.

Quand les roues sont noyées, il convient de garnir le fond de chaque auget d'une soupape qui s'ouvre quand ce fond arrive dans la position verticale inférieure, de manière à permettre à l'air d'entrer dans l'auget quand l'eau en sort. Quelquefois le fond de chaque auget est garni, suivant qu'il est plus ou moins long, d'un, deux ou trois trous de 0m,04 de diamètre; ces trous produisent le même effet que la soupape dont il vient d'être question; mais ils donnent lieu à une perte d'eau.

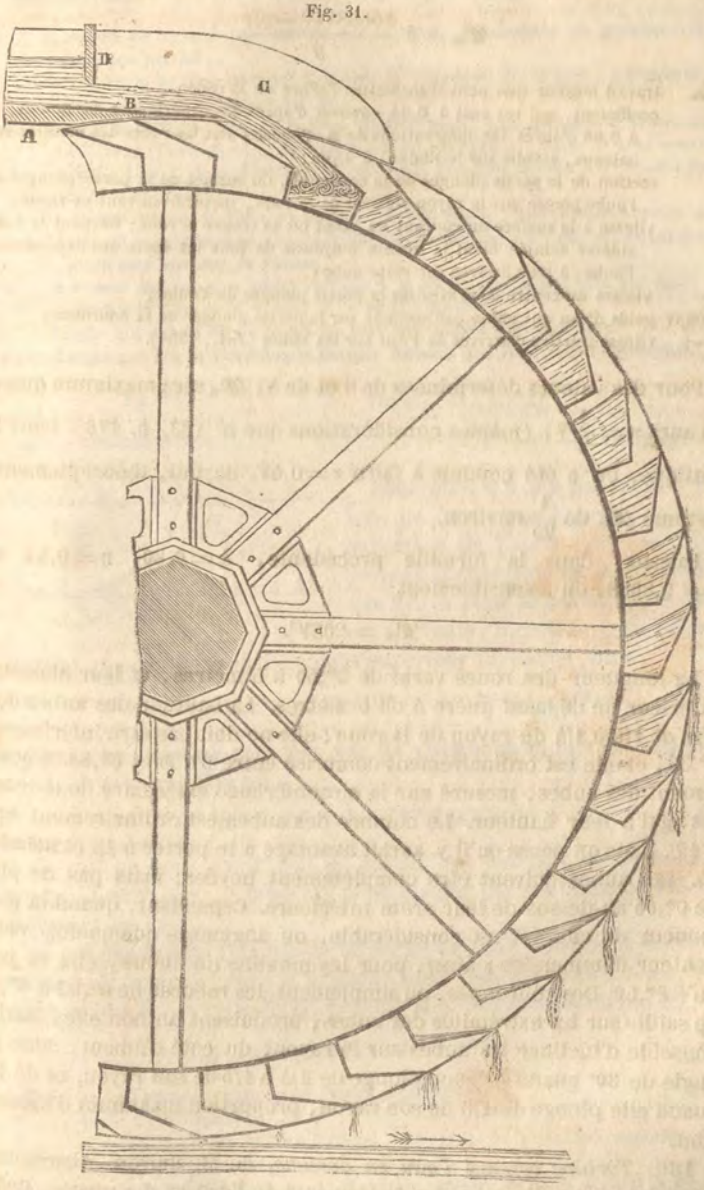
La *fig* 31 représente, à l'échelle de 1/40, la coupe perpendiculaire à l'axe d'une roue à augets recevant l'eau en dessus.

A fond du coursier en bois; il se prolonge jusqu'à une distance convenable en aval de l'axe de la roue par une plaque de fonte B;

C prolongement des joues latérales du coursier pour empêcher l'eau de jaillir hors de la roue;

D vanne.

Fig. 31.




**188.** *Roues se mouvant dans un courant à grande section, dites roues pendantes.* L'équilibre dynamique donne, pour une seconde,

$$T_m = k\,\frac{1000SV(V-v)v}{g}.$$

$T_m$ travail moteur que peut transmettre l'arbre de la roue ;

$k$ coefficient, qui est égal à 0,84 environ d'après les expériences de Bossut, et à 0,80 d'après les observations de M. Poncelet sur les roues des moulins sur bateaux, établis sur le Rhône, à Lyon ;

S section de la partie plongée de la couronne, ou surface de la partie plongée de l'aube placée sur le rayon vertical de la roue, mesurée suivant ce rayon ;

V vitesse à la surface du courant au point où se trouve la roue ; on peut la considérer comme étant la vitesse moyenne de tous les filets qui rencontrent l'aube, à leur arrivée sur cette aube ;

$v$ vitesse du centre de gravité de la partie plongée de l'aube ;

$1000SV$ poids d'eau qui afflue par seconde sur la partie plongée de la couronne ;

$V-v$ vitesse relative d'arrivée de l'eau sur les aubes (*Int.*, 1354).

Pour des valeurs déterminées de S et de V, $T_m$ sera maximum quand on aura $v = \frac{1}{2}V$ ; (mêmes considérations que n° 183, p. 170). Dans la pratique, on a été conduit à faire $v = 0{,}4V$, ce qui, théoriquement, diminue $T_m$ de $\frac{1}{25}$ environ.

Faisant, dans la formule précédente, $k = 0{,}80$, $v = 0{,}4V$ et $g = 9{,}8088$, on a sensiblement

$$T_m = 20SV^3.$$

La longueur des roues varie de $2^m{,}50$ à 5 mètres, et leur diamètre extérieur ne dépasse guère 4 ou 5 mètres. La hauteur des aubes doit être de 1/5 à 1/4 du rayon de la roue ; elle ne doit pas être inférieure à $0^m{,}33$, et elle est ordinairement comprise entre $0^m{,}50$ et $0^m{,}80$. L'écartement des aubes, mesuré sur la circonférence extérieure de la roue, est égal à leur hauteur. Le nombre des aubes est ordinairement égal à 12, mais on pense qu'il y aurait avantage à le porter à 18 et même à 24. Les aubes doivent être complétement noyées ; mais pas de plus de $0^m{,}05$ au-dessus de leur arête intérieure. Cependant, quand la profondeur du courant est considérable, on augmente quelquefois cette hauteur d'immersion ; ainsi, pour les moulins du Rhône, elle va jusqu'à $0^m{,}50$. Des couronnes, ou simplement des rebords de $0^m{,}05$ à $0^m{,}10$ de saillie sur les extrémités des aubes, produisent un bon effet. Navier conseille d'incliner les aubes sur le rayon, du côté d'amont, sous un angle de 30° quand la roue plonge de 1/4 à 1/5 de son rayon, et de 15° quand elle plonge de 1/3 de son rayon, proportion maximum d'immersion.

**139.** *Turbine versant l'eau en dessous*, de M. Burdin. Abstraction faite des pertes d'eau et des frottements de l'eau et des pivots, l'effet utile rendu par cette roue serait maximum, si l'eau entrait sans choc dans la roue, et en sortait en ne conservant aucune vitesse absolue.

Soit *fig.* 32 :

V la vitesse de l'eau à son arrivée sur la roue, représentée en grandeur et en direction par AV ;

$v$ la vitesse de la roue au point A milieu de longueur des aubes, représentée en grandeur et en direction par A$v$ ;

W la vitesse relative d'arrivée de l'eau contre l'aube ; elle est égale à la résultante AW de la vitesse V, et de la vitesse AB qui est égale à $v$ prise en sens contraire (*Int.*, 1358), et sa direction est celle que l'on doit donner à l'élément supérieur de l'aube ;

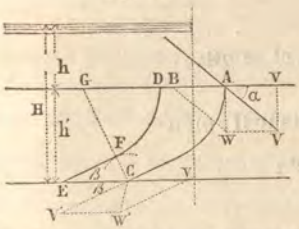
V′ la vitesse relative de l'eau au point C, bas de l'aube, par rapport à cette aube ; elle est représentée en grandeur et en direction par CV′, qui est dirigé suivan le dernier élément de l'aube ;

W′ la vitesse absolue que conserve l'eau à la sortie de l'aube ; elle est égale à la résultante CW′ de la vitesse V′ et de la vitesse $v$ ;

$\alpha$ l'angle que fait la direction AV du filet moyen avec l'horizontale ;

$\beta$ l'angle que fait la direction du dernier élément de l'aube avec l'horizontale.

Fig. 32.




On a (*Int.*, 1372)

$$W^2 = V^2 + v^2 - 2Vv\cos\alpha.$$

Pour qu'il n'y ait pas choc à l'entrée de l'eau dans la roue, l'élément supérieur de l'aube doit être dirigé suivant la direction de la vitesse relative W, et pour le cas où cette vitesse est verticale, direction qu'il convient en pratique de donner à l'élément supérieur de l'aube, on a

$$v = V\cos\alpha, \quad \text{et} \quad W^2 = V^2 - v^2 = V^2(1 - \cos^2\alpha).$$

Pour que l'eau ne conserve pas de vitesse absolue à sa sortie de la roue, il faut que l'on ait

$$W'^2 = V'^2 + v^2 - 2V'v\cos\beta = 0.$$

Ce qui ne peut avoir lieu qu'autant que l'on a $\beta = 0$, c'est-à-dire $\cos\beta = 1$ et $V' = v$ : il faudrait donc diriger horizontalement l'élément inférieur de l'aube.

Si ces conditions d'entrée et de sortie de l'eau pouvaient être rigoureusement remplies dans la pratique pour tous les filets fluides, l'effet utile rendu par la roue serait égal à l'effet dépensé, et on aurait

$$T_m = P(h + h') = PH.$$

$T_m$ travail moteur transmis par l'arbre de la roue ;

P poids d'eau dépensé ;

$h$ hauteur du niveau de l'eau d'amont, au-dessus de la surface supérieure de la roue ;

$h'$ hauteur verticale de la roue ; il paraît suffisant de faire $h'$ égal à $0^m,20$ ou $0^m,25$ ;

$H = h + h'$ chute totale ; la roue ne doit pas être noyée.

En négligeant les frottements de l'eau contre la roue, on a

$$V'^2 = W^2 + 2gh'.$$

Faisant dans cette formule

$$V' = v = V\cos\alpha, \quad \text{et} \quad W^2 = V^2(1 - \cos^2\alpha),$$

elle devient, en remplaçant $V^2$ par $2gh$,

$$2gh\cos^2\alpha = 2g(h + h') - 2gh\cos^2\alpha;$$

d'où l'on tire

$$\cos^2\alpha = \frac{H}{2h}.$$

On a $v = V\cos\alpha$, et par suite $\cos^2\alpha = \frac{v^2}{V^2} = \frac{v^2}{2gh}$;

donc

$$\frac{v^2}{2gh} = \frac{H}{2h}, \quad \text{d'où} \quad v^2 = gH.$$

Désignant par U la vitesse due à la hauteur H, on a

$$U^2 = 2gH = 2v^2;$$

d'où l'on tire

$$v = \frac{U}{\sqrt{2}} = 0{,}707U.$$

La vitesse de la roue, correspondant au maximum d'effet, doit donc être les 0,707 de la vitesse due à la hauteur de chute totale. Dans la pratique, par analogie avec les turbines Fourneyron, on peut conclure que la vitesse de rotation doit être moyennement les 0,665 de U.

Nous avons vu plus haut que, théoriquement, l'effet utile maximum était

$$T_m = PH.$$

Mais dans la pratique il y a toujours, à cause de l'épaisseur de la veine fluide, choc de l'eau contre les aubes, quelle que soit du reste la forme de ces aubes. De plus, il faut éviter de faire la partie inférieure de l'aube horizontale; car l'eau, en la quittant, serait frappée par l'aube suivante, d'où il résulterait une perte de travail considérable : ainsi la vitesse absolue de l'eau n'est jamais nulle au sortir de la roue. Il y a donc perte de travail par le choc de l'eau et par la vitesse qu'elle conserve, et on a toujours $T'_m < PH$.

Une turbine de ce genre, construite à Saint-Étienne, par M. Burdin, a donné $T'_m$ compris entre les 0,68 et les 0,70 de PH. La valeur de $h'$, c'est-à-dire la hauteur verticale des aubes, était $0^m,40$.

L'aube est engendrée par une droite qui se meut en restant horizontale, et en s'appuyant sur l'axe de la roue et sur une courbe continue DE, *fig.* 32, tracée sur un cylindre vertical dont le rayon est le rayon moyen de la roue. Cette courbe est verticale au point supérieur D, et tangente à la partie inférieure à une droite EF faisant avec l'horizontale un angle de 20 à 25°. Pour tracer cette courbe, par le point E on mène une droite EF faisant avec l'horizontale un angle de 20 à 25°; on prolonge cette droite jusqu'à son point de contact avec la circonférence décrite du point inférieur C de l'aube précédente, comme centre, avec un rayon CF égal à la plus courte distance de deux aubes successives; on prolonge le rayon CF, passant par le point de contact, jusqu'au point G où il rencontre la surface supérieure de la roue; du point G comme centre, avec un rayon égal à GF, on décrit l'arc de cercle FD, et la ligne DFE est la directrice de l'aube,

La distance des aubes, mesurée sur la circonférence moyenne de la roue, paraît devoir être comprise entre $0^m,11$ et $0^m,15$, et celle des directrices du distributeur, entre $0^m,16$ et $0^m,17$. Ces directrices sont dirigées suivant AV à leur partie inférieure.

Il paraît convenable de faire le rayon intérieur R' de la roue égal aux 0,65 ou 0,70 du rayon extérieur R. Le rayon moyen $r = \frac{R + R'}{2}$.

Le volume d'eau à dépenser doit pouvoir passer librement par les orifices laissés entre les aubes. Comme, d'après le mode de génération des aubes indiqué plus haut, la plus courte distance de deux aubes consécutives est sensiblement $d \sin \beta$ (*Int.*, 995), $d$ étant la distance de ces aubes mesurée sur la circonférence moyenne, si $l$ est la différence des deux rayons de la roue, l'ouverture laissée entre deux aubes consécutives est à peu près $ld \sin \beta$, et on a

$$Q = klnd \sin \beta V''.$$

$Q$ volume d'eau dépensé par seconde;
$k$ coefficient de la dépense, lequel, d'après les observations de M. Morin sur les orifices évasés des turbines de M. Fourneyron, est compris entre 0,80 et 0,86;
$n$ nombre d'aubes;
$V''$ vitesse de l'eau dans la plus petite section de l'orifice laissé entre deux aubes consécutives, $V'' = V'$.

L'espace occupé par les aubes et les assemblages étant à peu près le 1/25 de la surface de la roue, on a

$$nd = 2\pi r - 0{,}04 \times 2\pi r = 0{,}96 \times 2\pi r,$$

et, par suite, en supposant que l'eau arrive à plein orifice à la partie supérieure de la roue,

$$Q = kl \times 1{,}92\pi r \sin \beta V''.$$

On a

$$r = \frac{R + R'}{2} = \frac{R + 0{,}68R}{2} = \frac{1{,}68R}{2} = 0{,}84R;$$

d'où l'on tire

$$R = \frac{r}{0{,}84} = 1{,}19r,$$

et on conclut

$$R' = 0{,}68 \times 1{,}19r = 0{,}81r,$$

et

$$l = 0{,}38r.$$

Il faut non-seulement que les orifices de la roue puissent dépenser l'eau fournie par le cours d'eau; mais aussi que les orifices distributeurs puissent l'introduire dans la roue. En négligeant le jeu laissé entre le dessus de la roue et le bas de ces distributeurs, la vitesse dans ces orifices est celle V due à $h$, et en procédant comme pour la partie inférieure de la roue, on a

$$Q = kl'V(2\pi r - a)\sin\alpha.$$

$a$ espace horizontal occupé par les vannes distributrices et par leurs siéges, ou leurs pivots si elles sont à charnière;

$l'$ dimension des orifices distributeurs suivant le rayon; c'est aussi celles des orifices formés par les aubes, à leur partie supérieure.

**190.** *Turbine versant l'eau latéralement*, de M. Fourneyron. Ces turbines fonctionnent quand elles ne sont pas noyées (*fig.* 35); mais pour qu'elles utilisent toute la chute disponible, elles doivent, comme cela a lieu ordinairement, l'être complétement. Elles ont l'avantage de fonctionner quand elles sont noyées dans l'eau à une profondeur quelconque, et elles conviennent à toutes les chutes.

L'eau s'y meut horizontalement, d'où il résulte que la pesanteur ne modifie en rien ni le travail ni la vitesse de l'eau pendant que celle-ci est dans la roue; ce qui n'a pas lieu pour les turbines versant l'eau en dessous. L'effet de la force centrifuge est nul quand l'eau se meut verticalement; mais il n'en est pas ainsi dans ce cas, où l'eau se meut horizontalement.

Comme pour les turbines versant l'eau en dessous, abstraction faite des pertes d'eau et des frottements de l'eau et des pivots, l'effet utile serait maximum, si l'eau entrait sans choc dans la roue, et en sortait en ne conservant aucune vitesse absolue.

Soit, *fig.* 33 :

V la vitesse avec laquelle l'eau arrive au point A, représentée en grandeur et en direction par la ligne AV, qui est dirigée suivant la tangente à la directrice EA;

$v$ la vitesse de la roue au point A origine de l'aube, représentée en grandeur et en direction par A$v$, qui est tangente à la circonférence intérieure de la roue au point A;

W la vitesse relative d'arrivée de l'eau sur le point A de l'aube; elle est représentée en grandeur et en direction par la résultante AW des deux vitesses V et $v$, cette dernière étant prise de A en B, c'est-à-dire en sens contraire du mouvement de la roue (*Int.*, 1356). La direction AW est celle que l'on doit donner au premier élément de l'aube;

V′ la vitesse relative de l'eau au point C extrémité de l'aube, par rapport à cette aube; elle est représentée en grandeur et en direction par la droite CV′ dirigée suivant le dernier élément de l'aube;

$v'$ la vitesse de la roue au point C extrémité de l'aube; elle est représentée en grandeur et en direction par la droite C$v'$ tangente à la circonférence extérieure de la roue;

W′ la vitesse absolue de l'eau à sa sortie de la roue; elle est représentée en grandeur et en direction par la résultante CW′ des deux vitesses V′ et $v'$;

$\alpha$ l'angle que font entre elles les directions des deux vitesses V et $v$;

$\beta$ l'angle que fait la direction de la vitesse V′ avec la tangente à la circonférence extérieure de la roue au point C;

H la chute totale ou la différence de niveau de l'eau en amont et en aval de la roue;

$U = \sqrt{2gH}$ la vitesse due à la chute H;

P le poids d'eau dépensé par seconde en kilogrammes;

Q le volume d'eau dépensé par seconde en mètres cubes;

$r$ le rayon intérieur de la roue;

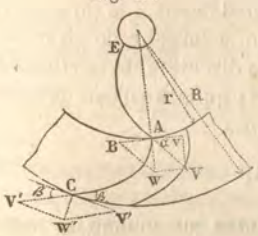
R le rayon extérieur de la roue;

$l$ la hauteur de la roue, ou mieux la dimension verticale des orifices laissés entre les aubes;

$a$ la distance de deux aubes successives, mesurée sur la circonférence intérieure de la roue;

$a'$ la distance de deux aubes successives, mesurée sur la circonférence extérieure de la roue.

Fig. 33.




On a (*Int.*, 1372)

$$W^2 = V^2 + v^2 - 2Vv\cos\alpha. \qquad (a)$$

Pour le cas où la vitesse W est dirigée suivant le rayon de la roue, direction qu'en pratique il convient de donner au premier élément de l'aube, on a $v = V\cos\alpha$, et par suite $W^2 = V^2 - v^2$.

Pour que la vitesse absolue W′ soit nulle, on doit avoir

$$W'^2 = V'^2 + v'^2 - 2V'v'\cos\beta = 0. \qquad (b)$$

Ce qui ne peut avoir lieu qu'autant que l'on a $\beta = 0$, c'est-à-dire $\cos\beta = 1$ et $V' = v'$. Cela conduirait à faire l'aube tangente à la circonférence extérieure; mais, outre qu'en pratique la vitesse W′ ne peut être nulle, puisqu'elle doit satisfaire au débit, il convient de ne pas faire l'aube tangente à la circonférence extérieure de la roue; car cette

aube tendrait à projeter l'eau sur l'aube suivante, ce qui produirait des réactions considérables.

M. Belanger, en supposant la levée de la vanne égale à la hauteur des aubes, d'où il résulte que l'eau remplit complétement les canaux formés par ces aubes, et en négligeant les frottements et les actions mutuelles de l'eau, les frottements des pivots, et l'influence du jeu laissé entre le vannage et la roue; mais en tenant compte de la force centrifuge, a posé la formule

$$V^2 + v^2 - W^2 = 2gH = U^2. \qquad (c)$$

De laquelle on tire, en remplaçant $W^2$ par sa valeur $(a)$,

$$Vv\cos\alpha = gH = \frac{U^2}{2}; \qquad (d)$$

d'où on conclut, pour le cas où $v = V\cos\alpha$,

$$v^2 = gH = \frac{U^2}{2}, \quad \text{et} \quad v = \frac{U}{\sqrt{2}} = 0{,}707U. \qquad (e)$$

Comme on a

$$v : v' = r : R, \quad \text{d'où} \quad v = v'\frac{r}{R} \quad \text{et} \quad v' = v\frac{R}{r}, \qquad (f)$$

on a donc

$$v' = 0{,}707U\frac{R}{r}.$$

Remarquant que la largeur de l'orifice par lequel l'eau arrive dans le canal laissé entre deux aubes, mesurée normalement à la direction de la vitesse V, est sensiblement $a\sin\alpha$, et que la largeur de ce canal à l'orifice de sortie, mesurée normalement à la direction de la vitesse V', est sensiblement $a'\sin\beta$ (*Int.*, 995), comme la quantité d'eau qui entre dans le canal est égale à celle qui en sort, on a

$$Vla\sin\alpha = V'la'\sin\beta,$$

ou, en remarquant que les arcs $a$ et $a'$ sont entre eux comme les rayons $r$ et R,

$$Vr\sin\alpha = V'R\sin\beta, \quad \text{d'où} \quad V = V'\frac{R}{r} \times \frac{\sin\beta}{\sin\alpha}.$$

Et comme, pour le maximum d'effet, on peut supposer, eu égard à la faible valeur de l'angle $\beta$, $V' = v'$, on a

$$V = v'\frac{R}{r} \times \frac{\sin\beta}{\sin\alpha}. \qquad (g)$$

Remplaçant, dans la formule (*d*), $v$ par sa valeur (*f*), et V par sa valeur (*g*), on en conclut

$$v'^2 = gH \frac{\text{tang}\,\alpha}{\sin\beta}. \qquad (A)$$

Comme (formule *e*) $v^2 = gH$, on a donc

$$\frac{v'^2}{v^2} = \frac{R^2}{r^2} = \frac{\text{tang}\,\alpha}{\sin\beta}, \qquad (B)$$

La formule (*g*) donne, en élevant au carré et en remplaçant $v'^2$ et $\frac{R^2}{r^2}$ par leurs valeurs (A) et (B),

$$V^2 = gH \frac{1}{\cos^2\alpha}.$$

Ce qui fait voir que l'on aura $V^2 = 2gH$, c'est-à-dire que la vitesse due à H ne sera pas modifiée à l'entrée de l'eau dans la roue, ce qui est convenable sous le rapport de l'effet utile, lorsqu'on aura $\cos^2\alpha = \frac{1}{2}$, c'est-à-dire $\alpha = 45°$.

Remplaçant, dans la formule (*b*), $V'^2$ et $v'^2$ par leur valeur commune (A), on conclut

$$W'^2 = 2gH \frac{\text{tang}\,\alpha(1 - \cos\beta)}{\sin\beta}. \qquad (h)$$

La perte de travail due à la vitesse que conserve l'eau est alors

$$\frac{P}{2g} W'^2 = PH \frac{\text{tang}\,\alpha(1 - \cos\beta)}{\sin\beta},$$

et l'effet utile rendu par la roue,

$$T_m = PH\left(1 - \frac{\text{tang}\,\alpha(1 - \cos\beta)}{\sin\beta}\right). \qquad (C)$$

Nous avons vu plus haut que la section de chaque canal formé entre deux aubes successives était, à l'orifice de sortie, $la' \sin\beta$ ; la somme de toutes les sections de sortie sera alors, en supposant que la tôle des aubes occupe les 0,04 de la circonférence extérieure,

$$0{,}96 \times 2\pi R l \sin\beta.$$

Comme, d'après M. Fourneyron, cette somme doit être égale au 1/4 de la surface du cercle intérieur de la roue, on a donc

$$\frac{1}{4}\pi r^2 \quad \text{ou} \quad \frac{1}{4}\pi R^2 \frac{\sin\beta}{\text{tang}\,\alpha} = 0{,}96 \times 2\pi R l \sin\beta ;$$

d'où l'on tire

$$l = 0{,}13\mathrm{R}\,\frac{1}{\operatorname{tang}\alpha}. \qquad \text{(D)}$$

Comme on a

$$\mathrm{Q} = 0{,}96 \times 2\pi\mathrm{R}l\,\sin\beta \times k\mathrm{V}',$$

on en conclut, en faisant le coefficient de la dépense $k = 0{,}80$, et en remplaçant $l$ par sa valeur (D),

$$\mathrm{R} = \sqrt{\frac{\mathrm{Q}\operatorname{tang}\alpha}{0{,}628\mathrm{V}'\sin\beta}}. \qquad \text{(E)}$$

Quand $\alpha = 45°$, on a $\operatorname{tang}\alpha = 1$, et les formules (A), (B), ($h$), (C), (D) et (E) deviennent respectivement (A'), (B'), ($h'$), (C'), (D') et (E') :

$$v'^2 = g\mathrm{H}\,\frac{1}{\sin\beta}, \qquad \text{(A')}$$

$$\frac{v'^2}{v^2} = \frac{\mathrm{R}^2}{r^2} = \frac{1}{\sin\beta}, \qquad \text{(B')}$$

$$\mathrm{W}'^2 = 2g\mathrm{H}\,\frac{(1-\cos\beta)}{\sin\beta}, \qquad (h')$$

$$T'_m = \mathrm{PH}\left(1 - \frac{(1-\cos\beta)}{\sin\beta}\right), \qquad \text{(C')}$$

$$l = 0{,}13\mathrm{R}, \qquad \text{(D')}$$

$$\mathrm{R} = \sqrt{\frac{\mathrm{Q}}{0{,}628\mathrm{V}'\sin\beta}}. \qquad \text{(E')}$$

*Application.* Il s'agit d'appliquer une turbine à un cours d'eau dont le débit est $1^{\text{m. cub.}},50$ par seconde, et la chute 4 mètres.

Supposant $\alpha = 40°\,30'$ et $\beta = 25°$, on a $\operatorname{tang}\alpha = 0{,}8541$, $\sin\alpha = 0{,}6494$, $\sin\beta = 0{,}4226$, $\cos\beta = 0{,}9063$, $\mathrm{U} = \sqrt{2g\mathrm{H}} = 8^{\text{m}},86$. Remplaçant les lettres par leurs valeurs dans les formules (A), (E), (B), (D), (C), on a successivement :

$$v' = \mathrm{V}' = \sqrt{9{,}8088 \times 4\,\frac{0{,}8541}{0{,}4226}} = 8^{\text{m}},9, \qquad \text{(A)}$$

$$\mathrm{R} = \sqrt{\frac{1{,}50 \times 0{,}8541}{0{,}628 \times 8{,}9 \times 0{,}4226}} = 0^{\text{m}},737, \qquad \text{(E)}$$

$$r = \mathrm{R}\sqrt{\frac{0{,}4226}{0{,}8541}} = 0{,}703\mathrm{R} = 0^{\text{m}},518, \qquad \text{(B)}$$

$$l = \frac{0{,}13 \times 0{,}737}{0{,}8541} = 0^{\text{m}},112, \qquad \text{(D)}$$

$$T_m = \text{PH}\left(1 - \frac{0{,}8541(1-0{,}9063)}{0{,}4226}\right) = \text{PH}(1-0{,}19) =$$

$$0{,}81\text{PH} = \frac{0{,}81 \times 1500 \times 4}{75} = 64{,}8 \text{ chevaux-vapeur.} \quad \text{(C)}$$

N étant le nombre de tours de la turbine par minute, on a

$$N = \frac{v' \times 60}{2\pi R} = \frac{8{,}9 \times 60}{2 \times 3{,}14 \times 0{,}737} = 115{,}33.$$

Il convient de vérifier si les orifices distributeurs peuvent débiter $1^{\text{m. cu.}},50$ par seconde. La formule $(g)$ donne

$$V = 8{,}9\,\frac{0{,}737}{0{,}518} \times \frac{0{,}4226}{0{,}6494} = 8^{\text{m}},24\,;$$

et comme la somme des orifices d'entrée de l'eau dans la roue est, en supposant que les aubes, normales à la circonférence intérieure de la roue, interceptent encore environ les 0,04 de cette circonférence,

$$0{,}96 \times 2\pi rl \sin\alpha,$$

la dépense par ces orifices est, pour une seconde,

$$0{,}96 \times 2\pi rl \sin\alpha \times kV = 0{,}96 \times 2 \times 3{,}14 \times 0{,}518 \times 0{,}112 \times 0{,}6494 \times 0{,}80 \times 8{,}24$$
$$= 1^{\text{m. cu.}},497, \text{ sensiblement } 1^{\text{m. cu.}},500.$$

*Résultats pratiques.* La formule (C) de l'application donne l'effet utile $T_m = 0{,}81\text{PH}$; mais des expériences faites en 1838 par M. Morin ont donné au maximum $T_m = 0{,}69\text{PH}$ pour une turbine, et $T_m = 0{,}79\text{PH}$ pour une autre; encore n'obtient-on d'ordinaire que $T_m = 0{,}65\text{PH}$ ou $T_m = 0{,}70\text{PH}$ quand la levée de la vanne est à peu près égale à la hauteur des aubes.

Le rapport de l'effet utile d'une turbine à l'effet total dépensé diminue à mesure que la vanne s'abaisse au-dessous du point supérieur des aubes; c'est ce que confirme le tableau suivant des résultats obtenus par M. Morin, sur une turbine de deux mètres de diamètre.

| LEVÉE de la vanne. | HAUTEUR de chute. | DÉPENSE par seconde. | NOMBRE de tours par minute. | RAPPORT de $T_m$ à PH. |
|---|---|---|---|---|
| m. | m. | m. cub. | | |
| 0.27 | 3.39 | 2.44 | 61.50 | 0.793 |
| 0.20 | 3.34 | 1.87 | 58.00 | 0.700 |
| 0.15 | 3.04 | 1.57 | 58.25 | 0.696 |
| 0.09 | 3.21 | 1.07 | 61.60 | 0.392 |
| 0.05 | 3.58 | 0.62 | 60.00 | 0.238 |

M. Fourneyron a cherché à diminuer l'inconvénient des faibles levées de vanne, en séparant la hauteur totale de la roue par des cloisons horizontales en tôle.

L'application précédente donne

$$\frac{v'}{U} = \frac{8,90}{8,86} = 1,0045, \quad \text{c'est-à-dire} \quad v' = 1,0045\sqrt{2gH}.$$

Dans l'une des expériences de M. Morin, la valeur de $v'$ correspondant au maximum d'effet a été $0,81\sqrt{2gH}$, et dans l'autre, $0,80\sqrt{2gH}$.

On a

$$v = v'\frac{r}{R} = \frac{0,518}{0,737} \times 1,0045\sqrt{2gH} = 0,707\sqrt{2gH},$$

ce que nous a déjà donné la formule $(e)$. Dans la pratique, la valeur de $v$ correspondant au maximum d'effet varie de $0,65\sqrt{2gH}$ à $0,69\sqrt{2gH}$ : ainsi l'on peut dire que la pratique confirme la théorie. La faible valeur pratique de la vitesse extérieure $v'$ de la roue, par rapport à la valeur théorique, est due à ce que le rapport $\frac{r}{R}$ est plus grand que ne l'indique la théorie ; ainsi il atteint quelquefois 0,83, au lieu que l'application faite plus haut donne 0,703 ; il est ordinairement compris entre 0,70 et 0,80. M. Fourneyron emploie la valeur 0,70 quand le rayon intérieur de la roue est petit.

L'effet utile maximum n'est pas sensiblement altéré quand la valeur de $v$ qui lui correspond augmente ou diminue d'un sixième à un cinquième.

D'après M. Morin, pour des chutes moyennes, la vitesse de l'eau dans le cylindre-vanne ne doit pas excéder le quart ou le cinquième de la vitesse due à la chute totale. De cette condition, on conclura le diamètre de la vanne, et en l'augmentant de $0^m,04$ ou $0^m,05$ pour l'épaisseur du cylindre et le jeu de la roue, on aura le diamètre intérieur de la roue. Du rapport qui doit exister entre les diamètres de la roue, indiqué ci-dessus, on conclura le diamètre extérieur.

L'écartement des aubes, suivant la circonférence intérieure de la roue, se prend à peu près égal à la hauteur $l$ de ces aubes.

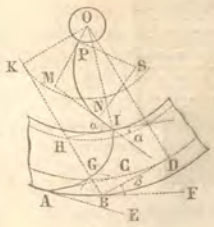
L'angle $\beta$, que font les aubes avec la circonférence extérieure de la roue, peut varier de 20° à 25°.

L'angle $\alpha$, que font les directrices qui amènent l'eau sur les aubes avec la circonférence intérieure de la roue, varie de 36° à 45°.

Le nombre des courbes directrices est moitié de celui des aubes quand ce dernier, qui est toujours pair, varie de 18 à 24, et le 1/3 quand le nombre des aubes dépasse 24. Outre ces courbes directrices, on en

place quelquefois d'autres qui ne s'étendent que de la circonférence intérieure de la roue jusqu'à moitié du rayon de cette circonférence.

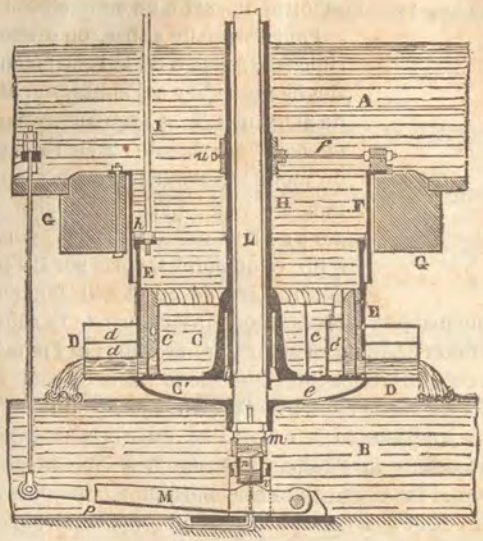
Fig. 34.




Pour tracer les aubes, on divise la circonférence extérieure de la roue en autant de parties égales qu'il y a d'aubes, *fig.* 34 ; des points de division A, B..., avec un rayon égal à $a'\sin\beta$, on décrit des arcs de cercle ; aux points A, B... on mène les droites AC, BD... faisant avec les tangentes AE, BF... des angles égaux à l'angle $\beta$ ; on mène le rayon BG perpendiculaire à BD, et du point H, pris sur BG prolongé, on décrit l'arc de cercle GI tangent à l'arc de rayon BG, et normal à la circonférence intérieure de la roue au point I. Le point H se détermine en menant par les différents points de GH des tangentes à la circonférence intérieure de la roue, et celui de ces points qui donne HI = HG est le centre de l'arc GI. Raccordant ensuite l'arc IG avec l'arc de rayon BG et la droite AC, on obtient la courbe IGA qui est la section horizontale de l'aube. On trace de même toutes les aubes ; mais on facilite cette opération en remarquant que toutes les droites analogues à BH sont tangentes à une même circonférence décrite du centre O de la roue, avec un rayon égal à la perpendiculaire OK abaissée sur le prolongement de BH, et en remarquant aussi que toutes les droites analogues à AC et BD sont tangentes à la circonférence décrite avec la perpendiculaire OD pour rayon. Tous les points analogues à H se trouvent sur une même circonférence dont le centre est celui de la roue.

Pour tracer les courbes directrices, on mène, *fig.* 34, la droite IM faisant l'angle $\alpha$ avec la tangente IH à la circonférence intérieure de la roue ; on mène ensuite la droite OM faisant l'angle IOM = OIM ; on prend IN égal au rayon extérieur OP du tube qui enveloppe l'arbre de la roue ; on élève les perpendiculaires PS, NS, et de leur point de rencontre S, avec le rayon SP = SN, on décrit l'arc de cerle PN, qui forme, avec la partie droite NI, la coupe horizontale de la directrice.

Fig. 35.




La figure 35 représente, à l'échelle de 1/40, la coupe par l'axe d'une des quatre turbines-Fourneyron construites au moulin à l'anglaise de Saint-Maur, près Paris, et commandant chacune dix paires de meules.

A bief supérieur ;

B canal de fuite ;

C espace dans lequel se trouvent les courbes directrices ;

*c* douze courbes directrices partant du moyeu et ayant 0m,36 de hauteur,

*c'* douze courbes directrices partant du milieu de l'espace annulaire C, et ayant 0m,30 de hauteur ;

C' plateau fixe portant les directrices *c*, *c'* ; il porte un moyeu très-élevé qui s'assemble sur le tuyau en fonte H ;

*i* bague en fer tournée ; elle est formée de deux morceaux, et sert à fixer le plateau C' sur le tuyau H ; en soulevant le plateau, on enlève la bague et on descend le plateau ;

D roue proprement dite, contenant trente aubes de 0m,27 de hauteur ;

*e* disque servant de bras à la roue. Il est percé de quatre trous qui permettent de retirer les objets qui peuvent pénétrer dans les compartiments ; son moyeu se fixe sur l'arbre à l'aide d'une bague en fer semblable à celle *i* ;

*dd* cloisons horizontales en tôle divisant la hauteur de la roue ; le disque qui termine supérieurement la roue est également en tôle ;

E vanne ; c'est un cylindre en fonte, dont le diamètre extérieur est exactement égal au diamètre intérieur de la roue ;

*o* coins en bois vissés contre le cylindre E. Leur forme est celle des canaux compris entre les directrices, qu'ils ferment quand on baisse la vanne. On a soin de les arrondir supérieurement et inférieurement, afin de diminuer la contraction des veines fluides, qui est d'autant plus grande que la vanne est plus rapprochée du plateau C'. Leur longueur, mesurée horizontalement et suivant la direction des canaux dans lesquels ils glissent, est de 0m,25 environ ;

*h* garniture formée d'un cuir recourbé, empêchant l'eau de s'échapper entre le cylindre E et le tuyau de retenue en fonte F;

I trois tiges servant à manœuvrer la vanne; elles pénètrent chacune dans le moyeu à écrou d'un pignon; une roue d'engrenage folle sur l'arbre L permet de faire tourner simultanément les trois pignons, et par suite de manœuvrer la vanne;

G charpente à laquelle est fixée le système;

H cylindre en fonte enveloppant l'arbre de la turbine, et auquel est fixé le plateau C' qui porte les directrices; il s'élève jusqu'au-dessus du niveau de l'eau, où il se fixe soit à une charpente, soit à une pièce de fonte;

*f* trois fortes tiges reliant un manchon en fonte qui entoure le cylindre H à la charpente G. Des vis *u* servent à centrer le tuyau H et à le fixer au manchon. Cette précaution est nécessaire lorsque, comme dans ce cas, la hauteur est grande;

*u* vis fixant le cylindre H et le maintenant dans la position verticale;

L arbre moteur en fonte;

*n* pointe en acier fixée par deux petites clefs dans une crapaudine en cuivre, dans laquelle arrive un filet d'huile; sur la tête de cette pointe tourne un grain d'acier dont est garni le bas de l'arbre L; ce grain est représenté coupé dans la figure. La pointe *n* est garnie de saignées latérales qui amènent l'huile sur toute la surface frottante;

*m* bague fixée au bas de l'arbre; elle sert à retenir l'huile et à maintenir l'arbre sur le pivot *n*. Par cette disposition, les matières solides seraient obligées de s'élever pour venir entre les surfaces frottantes;

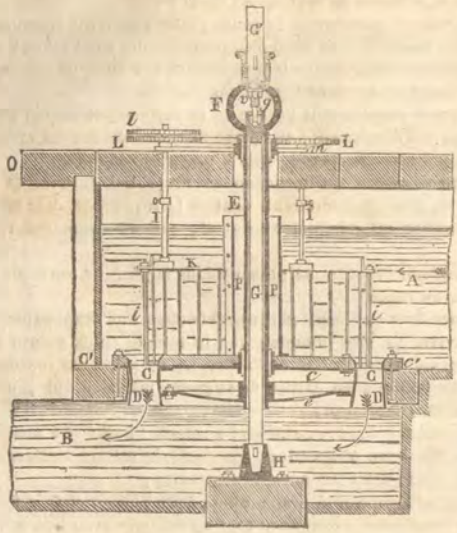
*v* chaise sur laquelle repose la crapaudine; deux petites clefs y fixent celle-ci, de manière à l'empêcher de tourner tout en lui permettant de se soulever;

M fort levier, de $2^m.57$ d'une articulation à l'autre, servant à maintenir le système mobile à une hauteur convenable;

*p* tube communiquant au-dessus du sol de l'usine, et amenant l'huile dans la crapaudine.

**191.** *Turbine* de M. Fontaine-Baron. Cette turbine est du genre de celle de M. Burdin (189); elle verse l'eau en dessous. La figure 36 en représente une à l'échelle de 1/60, de la force de 18 chevaux, construite à l'établissement de Vadenay, près Châlons-sur-Marne. La chute moyenne est de $1^m,40$ et la dépense de 1400 litres par seconde. Cette roue fait marcher quatre à cinq paires de meules.

Fig. 36.




A bief supérieur;

B canal de fuite;

C couronne en fonte portant trente-deux cloisons ou directrices qui forment autant de canaux amenant l'eau contre les aubes de la roue. La couronne et les directrices sont venues d'une seule pièce de fonte;

D couronne en fonte de $0^m,235$ de hauteur, formant la roue proprement dite; elle porte soixante-quatre aubes venues de fonte avec les deux cylindres qui la composent;

*e* disque servant de bras à la roue; il est creusé en forme de vasque, et, afin de pouvoir le nettoyer au besoin et serrer les écrous et les vis de pression qui fixent son moyeu sur le cylindre E, on l'a percé de trous vers le milieu de son rayon;

E cylindre en fonte servant d'arbre moteur; des vis de serrage fixent le moyeu du disque *e* à ce cylindre, sur lequel le moyeu entre à frottement;

F renflement du cylindre E;

G arbre fixe en fer de $0^m,07$ de diamètre;

H sabot en fonte dans lequel est claveté l'arbre G, et qui est solidement fixé sur une forte pierre de taille;

G' arbre proprement dit de la roue; il est solidement claveté dans le haut du cylindre E;

*g* pivot en fer forgé aciéré par le bas, par lequel la roue, son arbre G' et le cylindre E reposent sur le support G, qui porte à son sommet une crapaudine en bronze à grain d'acier. L'idée de faire ainsi reposer tout le poids de la partie mobile sur un pivot supérieur, ce qui rend le graissage facile, est due à M. Arson;

*v* écrou fixant le pivot *g* au système mobile, et réglant la hauteur de celui-ci;

*i* tiges des petites vannes en fonte et bois qui ferment chacune un des canaux qui amènent l'eau sur la roue;

K couronne en fonte sur laquelle sont fixées les trente-deux tiges *i*;

I trois tiges fixées à la couronne K ; elles sont filetées à leur partie supérieure, et elles portent chacune une douille, qui, en venant heurter contre le plancher O, limite la course de la tige et par suite celle des vannes ;

LL roues en fonte autour desquelles passe une chaîne sans fin qui les fait tourner simultanément ; les moyeux de ces roues sont taraudés et reçoivent le haut des tiges I, de sorte que ces tiges montent ou descendent suivant que l'on tourne dans un sens ou dans l'autre ;

*l* roue d'engrenage fixée sur une des roues L ; elle est manœuvrée par un pignon dont l'arbre porte une roue conique qui s'engrène avec un pignon monté sur l'arbre d'une manivelle ;

*m* croisillons en fonte réglant l'écartement des tiges I ; ils sont réunis par un moyeu qui porte un coussinet en bronze dans lequel tourne le cylindre E ;

*c* disque servant de bras à la couronne C ; son moyeu porte un coussinet en bronze qui guide le cylindre E à sa partie inférieure ;

*c'* plateau en bois de chêne formant l'ouverture des canaux directeurs ;

C' cadre en bois sur lequel sont boulonnés la couronne fixe C et le plateau *c'* ; il est scellé dans les murs de fondation, et placé à la hauteur du niveau inférieur ordinaire de l'eau ;

P cylindre en fonte formé de deux parties boulonnées, fixé sur le plateau *c'*, et empêchant le contact de l'eau avec le cylindre tournant E ;

O plancher de l'usine.

La figure 37 représente à l'échelle de 1/15 le tracé des aubes, des directrices et des petites vannes.

Fig. 37.




L'aube est formée de deux arcs de cercle : l'un, *ab*, a son centre situé sur le plan qui limite supérieurement la turbine, de sorte que cet arc est normal à ce plan ; l'autre, *bc*, a son centre situé au dessus de ce plan, à une distance telle, que *bc* étant tangent à *ab* au point *b*, il fasse avec le plan inférieur de la roue un angle qui ne dépasse pas 19 à 20°.

La directrice *ad* se termine inférieurement par un arc de cercle formant avec le plan supérieur de la roue un angle qui ne dépasse pas 11 ou 12°. Supérieurement, on donne à la directrice la forme qui permet le mieux l'introduction de l'eau.

Chaque vanne est formée par une plaque de fonte *e*, qui glisse contre le haut d'une directrice et dans deux rainures venues dans les couronnes, et qui vient se reposer sur la partie inférieure de la directrice consécutive quand la vanne est abaissée. Derrière la plaque *e*, se trouve fixée une garniture en bois, que l'on taille de manière à favoriser l'introduction de l'eau.

Les turbines de M. Fontaine-Baron rendent un effet utile égal aux 0,68 ou 0,70 du travail absolu du moteur quand les vannes laissent entièrement ouverts les canaux directeurs.

Lorsqu'on abaisse les vannes de manière à réduire la dépense dans le rapport de 4 à 3 environ, l'effet utile est encore les 0,575 du travail absolu du moteur à la vitesse du maximum d'effet.

La vitesse à la circonférence moyenne de la roue, correspondant au maximum d'effet, est les 0,548 de la vitesse due à la hauteur de chute (133), et elle peut varier de son 1/4, en plus ou en moins, sans que l'effet soit sensiblement diminué.

Une turbine de M. Fontaine-Baron, établie récemment à la filature d'Haudrecy, avec les aubes, dites *à déviation*, de MM. Girard et Callon (193), a donné au frein un rendement moyen de 77 p. 100 ; les constructeurs, MM. Fromont, Fontaine et Brault, de Chartres, avaient garanti 70 p. 100. La chute a varié de $1^m$,45 à $1^m$,783, et la dépense d'eau de 502 à 1089 litres par seconde, sans que le rendement ait varié sensiblement. Dans une expérience particulière, la turbine s'étant trouvée noyée de $0^m$,17, le rendement n'a plus été que de 62 pour 100 ; cependant, dans les expériences qui ont fourni 77 pour 100, la turbine était noyée de $0^m$,01 à $0^m$,13.

*Turbine double.* M. Fontaine-Baron construit encore une turbine double pour les cas où le volume d'eau varie dans des limites considérables. Elle est formée de deux séries bien distinctes d'aubes séparées par une couronne intermédiaire. Toutes les aubes et les trois couronnes sont fondues d'une seule pièce comme pour la turbine simple.

Il y a également deux séries de directrices fondues, comme les aubes, d'une seule pièce avec trois couronnes. Chacune des deux parties de la roue a un vannage semblable à celui d'une roue simple, et indépendant de celui de l'autre partie ; de sorte que l'on peut à volonté ne faire arriver l'eau que sur l un ou l'autre compartiment, ou sur les deux à la fois, suivant le volume d'eau à débiter.

**192.** *Turbine-Jonval*, perfectionnée par MM. A. Kœchlin et compagnie. Cette turbine est encore du système de celle de M. Burdin (189). Elle est placée à la partie supérieure d'un cylindre en fonte rétréci et alésé au point où elle se trouve, de manière à l'envelopper exactement en ne laissant qu'un millimètre de jeu au plus. La partie contenant la couronne qui porte les directrices s'évase légèrement. A la partie inférieure et au-dessous du niveau d'aval, dont la variation est indifférente, le cylindre vertical s'adapte sur un tuyau rectangulaire horizontal muni d'une vanne qui permet de suspendre à volonté l'arrivée de l'eau. Cette vanne est la seule disposée pour faire varier la dépense de petites quantités.

La roue est ordinairement placée à une hauteur intermédiaire entre les niveaux d'amont et d'aval, de sorte que la pression de l'eau sur les aubes est due en partie à l'aspiration. Cette disposition permet de diminuer la longueur de l'arbre de la roue.

Lorsque la dépense d'eau est variable, mais constante pendant de

certains laps de temps, on fixe à la couronne de la roue des coins obturateurs qui rétrécissent les canaux formés par les aubes. Pour une longueur d'aubes de $0^m,115\,4$, mesurée suivant le rayon, les obturateurs d'une turbine fermaient $0^m,067\,4$. On peut donc faire varier dans des limites très-éloignées le débit de cette roue.

On a reconnu, par des expériences faites au Bouchet, par M. Morin, que l'effet utile que rend cette roue est les 0,72 du travail absolu du moteur quand tous les orifices sont complétement ouverts, qu'il est environ les 0,70 ou 0,71 quand la moitié seulement des aubes sont garnies de leurs obturateurs, et encore les 0,63 quand toutes les aubes sont garnies de leurs obturateurs.

La vitesse à l'extérieur de la roue, correspondant au maximum d'effet, paraît devoir être les 0,70 de la vitesse $\sqrt{2gH}$ due à la chute totale H, et pouvoir varier de 1/4 en plus ou en moins sans que le rendement soit sensiblement diminué.

Les constructeurs admettent les proportions suivantes :

18 pour le nombre des aubes ;
1/16 du diamètre extérieur D pour la plus courte distance de deux aubes consécutives ;
1/8 D pour la longueur des aubes ou des canaux qu'elles forment, mesurée suivant le rayon.

Connaissant la dépense Q ou le diamètre D, on calcule l'autre de ces quantités par la relation suivante, dans laquelle H est la chute totale :

$$D = \sqrt{\frac{128Q}{9\sqrt{2gH}}}.$$

Les courbes directrices sont à peu près verticales à leur partie supérieure, et elles font un angle d'environ 34° avec l'horizon à leur partie inférieure. Les aubes sont à peu près inclinées à 70° à l'horizon à leur partie supérieure, et à 30° à leur partie inférieure.

Proportions de la turbine expérimentée au Bouchet :

| | | |
|---|---|---|
| Diamètre extérieur. | | $0^m,810$ |
| Largeur des augets | sans obturateur. | $0^m,120$ |
| | avec obturateur. | $0^m,048$ |
| Nombre des augets. | | 18 |
| Sections ou orifices de la roue, ensemble. | | $0^{m.c.},0706$ |
| Aire de l'orifice de la vanne de sortie. | | $0^{m\,c.},2977$ |
| La chute disponible a varié de. | | $1^m,76$ à $1^m,40$ |

**193.** Dans ces derniers temps, plusieurs ingénieurs se sont occupés de l'établissement des turbines, et quelques-uns sont arrivés à des dispositions qui ont donné de bons résultats.

La turbine de M. Krafft est de ce nombre ; elle verse l'eau en dessous comme celle de M. Fontaine-Baron, dont elle diffère naturellement plus

dans les détails que dans l'ensemble. M. Krafft a aussi établi des turbines doubles pour obvier à de grandes variations de dépenses d'eau. Des clapets, qui peuvent se rabattre sur toute la surface annulaire formée par les arêtes supérieures des directrices, permettent de supprimer à volonté le passage de l'eau par un plus ou moins grand nombre des canaux formés par les directrices, et par suite de modifier la puissance de la roue.

Des expériences faites sur une turbine Krafft établie à Chevroz, dans le Doubs, ont donné un rendement de plus de 75 pour 100 à des vitesses très-variables.

M. Charles Lombard a aussi donné une disposition des turbines versant l'eau en dessous. Des petites vannes partielles permettent de supprimer le passage de l'eau par le nombre voulu des canaux formés par les directrices.

MM. L.-D. Girard et Ch. Callon viennent d'apporter aux turbines versant l'eau en dessous, ou mieux aux turbines Fontaine-Baron, un perfectionnement qui ne manque ni d'originalité ni d'importance, et qui a fait donner au système la qualification d'*hydropneumatique*.

Ces ingénieurs, en foulant de l'air sous la turbine, y maintiennent l'eau au niveau de la surface inférieure mobile, quoique dans le canal de fuite l'eau s'élève à un niveau suffisant pour noyer la roue.

De cette disposition, il résulte plusieurs avantages, dont le principal est que l'on peut n'ouvrir qu'un très-petit nombre des vannes partielles, et par suite réduire considérablement le débit de la roue, sans que le rapport de l'effet utile au travail total soit considérablement diminué. On conçoit que si la roue tournait dans l'eau, ce rapport diminuerait considérablement, puisque les résistances dues au mouvement de la roue restent à peu près les mêmes, quel que soit le débit de la roue.

Des expériences faites par MM. Girard et Callon sur une turbine hydropneumatique établie à la papeterie d'Égreville ont montré que, selon que le nombre des vannettes ouvertes a varié de 10 à 30 sur le nombre total 40, l'effet de l'hydropneumatisation a varié de 25 à 9 pour 100.

D'autres expériences faites sur une turbine hydropneumatique établie dans une papeterie de Troyes ont montré que le nombre des vannettes ouvertes ayant varié de 10 à 32 sur le nombre total 38, et la puissance de 9,35 à 22,08 chevaux, l'effet utile a été de 0,77 sans variation bien sensible.

Ces résultats permettent donc de ne pas trop diminuer le diamètre des turbines, et par suite d'obtenir une vitesse de rotation non exagérée. C'est même pour atteindre ce but que MM. Girard et Callon ont étudié une turbine, dans laquelle il n'y aurait que quelques vannettes placées dans un tuyau de chute amenant l'eau sur une partie seulement du contour de la roue.

La turbine de MM. Girard et Callon contenant autant de courbes directrices que d'aubes, la section normale des tuyaux *adducteurs* est moindre que celle des orifices récepteurs ; d'où il résulte une libre déviation des veines liquides, ce qui est du meilleur effet dans une turbine hydropneumatique. De plus, les corps charriés s'arrêtent entre les directrices, d'où on les retire plus facilement que s'ils étaient descendus entre les aubes.

M. Girard a fait établir une turbine hydropneumatique fonctionnant sous une charge de $0^m,45$ à $0^m,60$ et dépensant de 3000 à 5000 litres d'eau par seconde; son diamètre est de $3^m,50$, et elle fait moyennement 20 tours par minute.

Une autre turbine, établie par M. Girard, au Conservatoire des arts et métiers, a donné des résultats, certifiés par MM. Morin et Tresca, qui se résument ainsi :

1° Pour des chutes qui ont varié de 4 à 12 mètres, et pour des dépenses d'eau de 4 à 15 litres par seconde, le rendement n'a jamais été inférieur à 0,65 ;

2° Ce rendement diminue avec l'ouverture de la vanne sans être jamais inférieur à 0,71 quand la vanne est entièrement ouverte ;

3° Pour les chutes de 9 à 10 mètres, le rendement s'est élevé à 0,76. Cette turbine a fait 157 tours par minute sous la charge de $3^m,88$, et 360 sous celle de $12^m,16$. Elle avait été calculée pour une chute de 50 mètres et un débit de 30 litres par seconde.

## MACHINES A ÉLEVER L'EAU.

194. *Machines à colonne d'eau.* Ces machines, employées en plusieurs endroits pour les épuisements des mines, peuvent être à double effet ; mais elles sont ordinairement à simple effet, c'est-à-dire que la colonne d'eau n'agit que sur une des faces du piston. Elles communiquent le mouvement à des pompes, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un balancier, dont les bras sont inégaux, afin de diminuer la course des pistons des pompes.

L'effet utile rendu par ces machines, c'est-à-dire le produit du poids d'eau élevé par la hauteur d'élévation, peut être exprimé par

$$k\text{PH}.$$

P poids d'eau dépensé ;
H hauteur de chute ;
PH effet total dépensé ;
$k$ coefficient, qui provient du frottement de l'eau dans les tuyaux et le corps de pompe, et de celui des pistons et autres organes de la machine ; des changements de direction et de vitesse de l'eau ; de la vitesse que conserve l'eau motrice en sortant du tuyau d'évacuation et de celle que conserve l'eau élevée en sortant du tuyau ascensionnel, etc.

Les anciennes machines, dites de Hœll, employées aux épuisements des mines de Hongrie, ont donné les résultats du tableau suivant, que nous extrayons du *Traité des machines* de Hachette :

| HAUTEUR des sources. | DIAMÈTRES des pistons. | EAU dépensée en 24 heures. | HAUTEUR d'élévation de l'eau. | EAU élevée en 24 heures. | RAPPORT de l'effet utile à l'effet dépensé. |
|---|---|---|---|---|---|
| m. | m. | m. cub. | m. | m. cub. | |
| 85.757 | 0.352 | 1900.328 | 89.656 | 817.036 | 0.45 |
| 89.656 | 0.325 | 2467.965 | 214.290 | 479.879 | 0.46 |
| 79.910 | *id.* | 685.550 | 46.777 | 394.185 | 0.33 |
| 79.910 | *id.* | 582.711 | 28.585 | 589.566 | 0.36 |
| 89.656 | *id.* | 2467.965 | 66.267 | 1336.845 | 0.40 |

Le diamètre du tuyau de chute de la première machine de ce tableau est de $0^m,162$. La course du piston est de $1^m,95$, et il s'élève et s'abaisse environ sept fois par minute.

Dans les machines établies plus récemment dans les mines de Hongrie, du Hartz, etc., l'effet utile est plus considérable que ne l'indique le tableau précédent, et il paraîtrait que des machines établies à Freyberg, en Saxe, ont donné un effet utile égal à 0,70 PH, et même 0,75 PH quand les pompes mues par les machines travaillaient avec toute l'eau qu'elles pouvaient contenir.

On est porté à supposer que les deux énormes machines construites à Huelgoat, par M. Juncker, produiront ce dernier effet utile quand elles fonctionneront sous la charge que l'on doit atteindre. Quand la quantité d'eau à élever n'était que de 29.9 litres par seconde pour les deux machines, et la hauteur d'élévation 179 mètres, l'effet utile n'était que de 0,45 PH. Les dimensions ont été déterminées pour élever 30 litres d'eau, par seconde et par machine, à une hauteur de 230 mètres; conditions dans lesquelles se trouveront les machines quand les travaux souterrains seront arrivés à la profondeur qu'ils doivent atteindre.

La chute motrice étant de 60 mètres, on présume que la dépense d'eau sera de 160 à 175 litres par seconde pour élever les 30 litres à 230 mètres, d'où il résulterait un effet utile de 0,72 à 0,66 PH. M. Juncker compte sur une dépense de 178 litres d'eau et un effet utile de 0,65 PH.

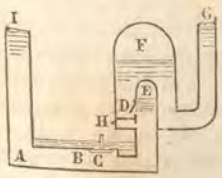
Ces deux machines, établies à 110 mètres environ au-dessous de la surface du sol, élèveront l'eau d'un seul jet à 230 mètres de hauteur, sans aucun intermédiaire, ni levier, ni engrenage (page 224). Le piston soupape qui permet à l'eau d'arriver sur le piston moteur est disposé de manière qu'au commencement et à la fin de la course de ce dernier, l'eau n'arrive qu'avec une très-faible vitesse, ce qui évite tout changement de direction brusque et toute secousse; aussi ces énormes machines exécutent-elles leurs grands mouvements sans le moindre bruit.

Les cylindres de ces machines sont en fonte et ouverts par le haut; ils ont $1^m,03$ de diamètre et $2^m,75$ de hauteur. Le piston est en bronze, avec une simple garniture en cuir; sa course est de $2^m,30$, et il en exécute jusqu'à 5,5 par minute. La tige de pompe est fixée directement au piston moteur; elle traverse le fond du cylindre, et elle descend jusqu'au fond du puits où elle s'adapte directement au piston de la pompe. Afin de faire en partie équilibre au poids de 16000 kilogr. environ de la tige de pompe, on a imaginé de placer le cylindre moteur à 14 mètres au-dessous de la galerie d'écoulement des eaux; ce qui oblige d'élever l'eau, après son action sous le piston moteur, à 14 mètres de hauteur; c'est la tige qui, en descendant, produit ce travail. Cette disposition porte à 74 mètres la hauteur du tuyau de chute, qui pouvait n'être que de 60 mètres, hauteur de chute motrice. Les tuyaux de chute et d'évacuation ont $0^m,38$ de diamètre, le corps de pompe a $0^m,455$, et la colonne d'ascension $0^m,275$.

**195.** *Bélier hydraulique.* Cette machine, fig. 38, imaginée par Montgolfier en 1797, se compose des parties suivantes :

AB *corps de bélier;* il établit la communication entre le réservoir alimentaire, ou le tuyau de chute AI, et la partie opérante de la machine;
C *soupape d'arrêt*, plus dense que l'eau;
D *clapet d'ascension*, qui est respectivement fermé ou ouvert, quand la soupape C est ouverte ou fermée;
la partie qui porte la soupape C et le clapet D s'appelle *tête du bélier;*
E *matelas d'air* destiné à diminuer les fortes secousses de l'eau contre la tête du bélier;
F *réservoir d'air* destiné à rendre régulière l'ascension de l'eau;
G *tuyau d'ascension;*
H *clapet aspirateur* s'ouvrant du dehors au dedans, et destiné à fournir, à chaque coup de bélier, une certaine quantité d'air au matelas E et au réservoir F, qui, sans cette précaution, en seraient promptement privés.

Fig. 38.




La soupape C étant abaissée, l'eau tend à s'écouler par l'orifice ouvert avec une vitesse due à la hauteur de l'eau dans le réservoir alimentaire; mais cette soupape étant d'un poids convenable, elle est entraînée par le courant, et elle vient s'appliquer sur son siége, de manière à fermer passage à l'eau, qui, en vertu de sa vitesse acquise, réagit contre les parois de l'appareil, ouvre le clapet D, pénètre dans le réservoir F, et de là dans le tuyau d'ascension, où elle s'élève à un niveau supérieur à celui du réservoir alimentaire. Bientôt la vitesse que possédait l'eau est détruite, le clapet D se referme, la soupape C s'abaisse, et une nouvelle période recommence sans interruption. Dès que l'eau a réagi sur la tête du bélier après la fermeture de la soupape C, en vertu de l'élasticité du matelas E et des parois de l'appareil, il se produit un retour d'eau vers

la source, qui diminue la pression au point de permettre au clapet H de s'ouvrir et de laisser entrer une certaine quantité d'air dans l'appareil.

Quelquefois la soupape C et le clapet D sont remplacés par des boulets creux dont le poids est double de celui de l'eau qu'ils déplacent. Dans ce cas, afin de ne pas gêner la circulation de l'eau dans l'appareil, on place le boulet d'arrêt sur le prolongement de AB, au delà de la position du boulet d'ascension. On a soin de garnir de cuir ou de toile goudronnée les orifices que ces boulets doivent fermer.

Un bélier construit par M. Montgolfier fils, à Mello, auprès de Clermont-sur-Oise, est muni de 7 boulets ou soupapes d'arrêt de $0^m,04$ de diamètre, dont les siéges sont sur une même platine en fonte; le boulet ou clapet d'ascension a aussi $0^m,04$ de diamètre. Le corps de bélier est en fonte et pèse 1450 kilogrammes; la tête du bélier seule pèse 200 kilogrammes. L'épaisseur des tuyaux est de $0^m,014$. La capacité du réservoir à air n'est que de 6 litres. Ce bélier bat 60 coups à la minute. (Consulter le tableau suivant.)

Jusqu'à présent, la théorie n'a pu donner une expression satisfaisante de l'équilibre dynamique de cette machine, dans laquelle il se passe des réactions qu'on ne peut analyser. La pratique même n'a donné que des résultats trop discordants pour permettre d'établir une formule générale, d'une exactitude suffisante, établissant les relations qui doivent exister entre les dimensions des différentes parties du bélier, ainsi que le rapport de l'effet utile à l'effet dépensé. Cependant, d'après les résultats d'expériences faites par Eytelwein sur deux béliers de différentes grandeurs, M. d'Aubuisson a conclu la formule pratique

$$ph = 1{,}20\,P(H - 0.2\sqrt{Hh}).$$

$p$ poids d'eau élevé;
$h$ hauteur d'élévation;
P poids d'eau dépensé;
H hauteur de chute.

Dans ses expériences, Eytelwein a reconnu :

1° Qu'une grande longueur de corps de bélier était avantageuse à l'effet; que jamais cette longueur ne devait être moindre que les 3/4 de la hauteur à laquelle on élève l'eau, et que son diamètre est convenablement donné par l'expression $1.7\sqrt{Q}$, Q étant le volume d'eau dépensé par seconde;

2° Que le diamètre du tuyau d'ascension pouvait être moitié de celui du corps de bélier;

3° Que le réservoir à air était indispensable, et que sa capacité, qui ne paraissait pas avoir une grande influence sur l'effet, était égale à celle du tuyau d'ascension;

4° Que les deux soupapes devaient être très-rapprochées l'une de l'autre, et que celle d'arrêt pouvait être indifféremment placée en amont ou en aval du réservoir à air;

5° Qu'il était essentiel que l'ouverture de la soupape d'arrêt ne fût pas moindre que la section du corps de bélier; mais qu'elle pouvait lui être égale ou un peu supérieure;

6° Que l'effet serait diminué par le poids du battant s'il excédait une certaine limite.

Quand le plus grand des béliers soumis à l'expérience par Eytelwein a été reconnu disposé de la manière la plus avantageuse, le corps du bélier avait 13m,33 de longueur et 0m,0567 de diamètre, et l'aire de la soupape d'arrêt était de 0m.c.,0024. La disposition du bélier était celle indiquée fig. 38.

Des expériences d'Eytelwein, il résulte que le rapport de l'effet utile à l'effet dépensé est d'autant plus grand que la hauteur d'élévation est plus petite par rapport à celle de chute ; ainsi, pour une chute de 3m,066, et une hauteur d'élévation de 8m,017, ce rapport a été de 0,90, valeur plus considérable que pour toute autre machine ; au lieu que la chute étant de 0m,601, et la hauteur d'élévation de 11m,78, ce rapport n'a plus été que de 0,181.

*TABLEAU des proportions de différents béliers, et du rapport de l'effet utile à l'effet dépensé.*

| CORPS DE BÉLIER. | | HAUTEUR | | DIAMÈTRE de la colonne d'ascension. | EAU dépensée en 1'. | EAU élevée en 1'. | RAPPORT de l'effet utile à l'effet dépensé. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| diamètre. | longueur. | de chute. | d'élévat. | | | | |
| m. | m. | m. | m. | m. | litres. | litres. | |
| » | » | 2.60 | 16.06 | » | 68.00 | 6.24 | 0.570 |
| 0.108 | 33.00 | 11.37 | 39.44 | » | 140.00 | 17.50 | 0.653 |
| 0.054 | 32.50 | 10.60 | 34.10 | » | 84.00 | 17.00 | 0.654 |
| 0.203 | 8.00 | 0.979 | 4.55 | » | 1987.00 | 269.00 | 0.629 |
| 0.027 | 33.00 | 7.00 | 60.00 | 0.14 | 12.42 | 0.97 | 0.670 |

Le premier des béliers de ce tableau est celui que Montgolfier avait établi dans son habitation à Paris ;

Le deuxième est celui de Mello, cité plus haut ;

Le troisième a été établi à Lyon par M. Fay-Sathonay, ancien maire de Lyon ; la longueur du tuyau d'ascension est de 227 mètres ;

Le quatrième est construit à la blanchisserie de M. Turquet, près de Senlis ;

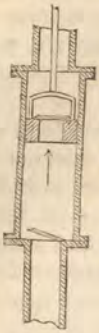
Le cinquième se trouve près de Clermont-Oise, dans la sous-préfecture de M. Larochefoucault ; la longueur du tuyau d'ascension est de 420 mètres.

**196.** *Pompes.* Les pompes sont dites à *simple effet*, lorsqu'elles n'élèvent l'eau que pendant la montée ou pendant la descente du piston (fig. 39 et 40), et à *double effet*, lorsque l'eau est élevée pendant la montée et pendant la descente du piston.

Lorsque le piston s'élève au-dessus du niveau de l'eau dans le puisard, on dit que la pompe est *aspirante*.

Une *pompe élévatoire* est celle qui élève l'eau pendant la montée du piston (fig. 39), et une *pompe foulante* est celle qui l'élève pendant la descente du piston (fig. 40). Une pompe à double effet est à la fois *foulante et élévatoire*.

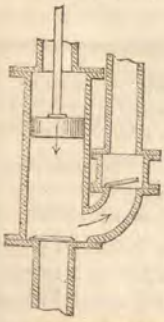
Fig. 39.



Une pompe peut être *aspirante et élévatoire*, ou *aspirante et foulante*, ou encore *aspirante, foulante et élévatoire;* l'un de ces cas se réalise toutes les fois que le piston s'élève à un niveau supérieur à celui de l'eau dans le puisard, ce qui a lieu généralement.

Le *piston* n'est quelquefois qu'un simple morceau de bois de charme, qu'il convient de faire bouillir dans l'huile; mais pour les pompes de quelque importance, il est en fonte ou en bronze. La garniture est en cuir, et elle forme sur les faces du piston un godet à contour flexible que l'eau comprimée applique contre les parois du corps de pompe, ce qui donne une garniture *autoclave.*

Fig. 40.



Souvent, comme dans la fig. 41, le piston est un cylindre métallique plein ou creux, d'une longueur un peu supérieure à sa course, et d'un diamètre de $0^m,01$ à $0^m,02$ plus petit que celui du corps de pompe. Ce piston, appelé *plunger* par les Anglais, plonge dans le corps de pompe et prend la place de l'eau qui s'y trouve, en l'obligeant de s'élever dans le tuyau d'ascension; en se retirant, il laisse un vide qui produit l'aspiration. La garniture de ce piston est fixe et sert de *stuffing-box.*

Une pompe à simple effet exige l'emploi de deux soupapes : l'une, dite *soupape d'aspiration*, placée sur le tuyau d'aspiration, le plus près possible du point inférieur de la course du piston; l'autre, appelée *soupape de retenue*, placée sur le tuyau d'ascension. L'une de ces soupapes peut être placée sur le piston (fig. 39), qui est alors percé d'un orifice convenable pour le passage de l'eau; la soupape fixe prend le nom de *soupape dormante*. Une pompe à double effet est garnie de quatre soupapes dormantes; le piston n'en porte pas.

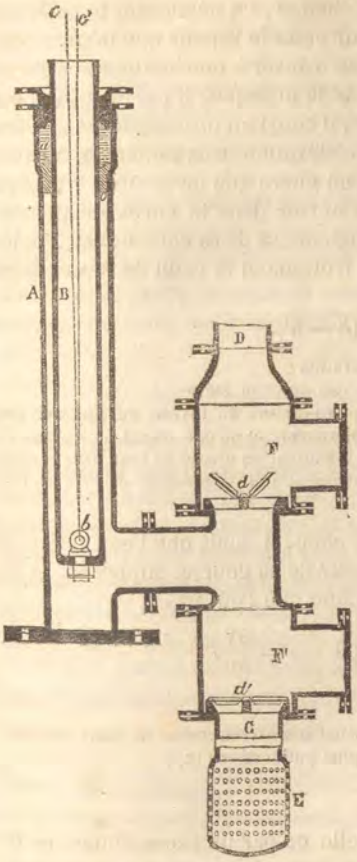
Afin de pouvoir vérifier facilement l'état des soupapes et en rendre rapides les réparations, il convient de renfler les tuyaux aux points où elles se trouvent (fig. 41); ces renflements, que l'on nomme *chapelles*, portent une grande ouverture que l'on ferme par une plaque de fonte boulonnée.

La figure 41 représente à l'échelle de 1/20 la coupe par l'axe d'une pompe à piston plongeur.

A corps de pompe;

B piston, au fond duquel est boulonnée une oreille à laquelle s'articule la tige de la pompe. En fixant la tige au bas du piston, on diminue son obliquité, et par suite le frottement du piston dans son stuffing-box;

Fig. 41.




*bc*, *bc'* lignes représentant les positions de l'axe de la tige dans ses plus grands écarts;
*a* étoupes du stuffing-box;
*o* coussinet en bronze retenant les étoupes;
FF' chapelles;
D tuyau d'ascension;
C tuyau d'aspiration;
E *lanterne*;
*d* soupape de retenue;
*d'* soupape d'aspiration.

Si le piston faisait un vide parfait, l'eau s'élèverait dans la colonne d'aspiration à une hauteur de $10^m,33$ au-dessus du niveau du puisard, hauteur faisant équilibre à la pression atmosphérique au point où se trouve la pompe; mais dans la pratique, quand le piston est au bas de sa course, la pression de l'air qui occupe l'espace compris entre le piston et la soupape d'aspiration étant, en négligeant le poids de la soupape, égale à la pression atmosphérique, quand le piston est en haut de sa course, la pression de cet air devient

$$h\,\frac{q}{Q+q};$$

$h$ pression atmosphérique;
$q$ *espace nuisible* ou volume de l'air lorsque le piston est au bas de sa course;
$Q$ volume engendré par le piston dans une levée;
$Q+q$ volume occupé par l'air lorsque le piston est en haut de sa course.

Pour qu'après un plus ou moins grand nombre de coups de piston, la pompe puisse s'amorcer, c'est-à-dire pour que l'eau puisse entrer dans le corps de pompe, il faut donc que l'on ait au maximum, en désignant par $x$ la hauteur de la soupape d'aspiration au-dessus du puisard, et en négligeant le poids de cette soupape,

$$x = h - h\,\frac{q}{Q+q} = h\left(1 - \frac{q}{Q+q}\right).$$

Il ne faut pas seulement que l'eau puisse pénétrer dans la partie infé-

rieure du corps de pompe, mais aussi qu'elle puisse atteindre le point le plus élevé de la course du piston, lequel, en négligeant le poids des soupapes et la force élastique de l'air et de la vapeur que dégage l'eau soumise à une faible pression, peut se trouver à une hauteur $h = 10^{m},33$ au-dessus du niveau du puisard. Dans la pratique, il est rare que l'eau puisse s'élever à 9 mètres de hauteur; il convient de considérer 8 mètres à $8^{m},50$ comme hauteur moyenne d'élévation maximum. La hauteur de la colonne d'aspiration ne se prend guère que de 5, 6 ou 7 mètres.

La vitesse avec laquelle l'eau peut entrer dans le corps de pompe, lorsque le piston occupe un point quelconque de sa course, est, en négligeant le poids des soupapes, leur frottement et celui de l'eau contre le tuyau d'aspiration.

$$v = \sqrt{2g(h - h')}. \qquad (a)$$

$v$ vitesse de l'eau dans la soupape d'aspiration;
$h$ pression atmosphérique, exprimée en eau que l'on élève;
$h'$ hauteur du point où se trouve le piston au-dessus du niveau du puisard. Cela suppose que l'eau ne dégage ni air ni vapeur, et qu'elle atteint le piston; s'il n'en était pas ainsi, $h'$ serait égale à la hauteur du niveau de l'eau dans le corps de pompe, au-dessus du puisard, augmentée de la pression de l'air et de la vapeur qui séparent l'eau du piston.

Pour que le piston fonctionne sans choc, il suffit que l'eau arrive en même temps que lui au point supérieur de sa course. Supposant la vitesse du piston uniforme, il suffira donc que l'on ait

$$ksv = \mathrm{SV}, \quad \text{d'où} \quad s = \frac{\mathrm{SV}}{kv}.$$

$k$ coefficient de la dépense (139);
$s$ section de la soupape d'aspiration;
$v$ vitesse de l'eau dans cette soupape, quand son niveau arrive au point supérieur de la course du piston; $v$ a alors sa plus petite valeur $(a)$;
S section du piston;
V vitesse du piston.

Si le piston est mû par une manivelle ou par un excentrique, sa vitesse n'est pas uniforme; dans ce cas, pour s'assurer que le corps de pompe sera plein quand le piston arrivera en haut de sa course, on déterminera d'abord par tâtonnement le point où l'eau peut commencer à ne plus suivre le piston; pour ce point on aura

$$ksv = \mathrm{SV},$$

$v$ et V ayant les valeurs qui correspondent à ce point, $v$ se détermine par la formule $(a)$, et V est donnée, d'une manière approchée, à l'aide d'une épure représentant le mouvement du piston par rapport à celui du bouton de la manivelle. Pendant que la manivelle termine le reste de sa course, il faut que le volume d'eau qui s'introduit dans le corps de pompe soit égal au volume engendré par le piston pour arriver à la fin de sa course.

Ce volume est (n° 158, formule (*e*))

$$Q' = Tks\sqrt{2g}\left(\sqrt{h_1} - \frac{Tks\sqrt{2g}}{4S}\right).$$

Q' volume d'eau qui s'introduit dans le corps de pompe pendant le reste de la marche du piston ;

T temps que met le piston à terminer sa course ;

$h_1$ différence de charge sur les deux faces de la soupape d'aspiration, au commencement du temps T ; elle est égale à $h$ diminuée de la hauteur du point où l'eau commence à ne plus suivre le piston, au-dessus du puisard.

Au n° 158, la section $s$ de la soupape représente la section de l'orifice d'écoulement, et la section S du corps de pompe, la section A du bassin qui se remplit.

Pour que le piston ne choque pas l'eau quand il change de direction, on doit donc avoir, au minimum,

$$Q' = LS.$$

L espace qu'il reste à parcourir au piston pour terminer sa course.

Dans la pratique, il convient non-seulement d'atteindre cette limite pour Q', mais aussi que l'eau accompagne le piston pendant toute sa course. On devra donc prendre $s$ pour le cas où les valeurs, correspondantes entre elles, de V et de $v$ exigent la valeur maximum de $s$.

Les diamètres des tuyaux d'aspiration et d'ascension sont ordinairement compris entre la 1/2 et les 2/3 de celui du corps de pompe ; il ne convient pas de les prendre de moins de la moitié, et quelquefois ils sont égaux à celui du piston.

Pour une pompe quelconque, l'équilibre dynamique donne, en négligeant toutes les résistances passives (49),

$$\mathcal{T}_m = PH.$$

$\mathcal{T}_m$ travail moteur transmis à la tige du piston ;

P poids d'eau élevé ;

H hauteur à laquelle on élève l'eau au-dessus du puisard ;

PH effet utile produit.

Dans la pratique, l'effet utile est diminué par le frottement de la garniture du piston contre les parois du corps de pompe, par celui de la tige du piston dans le stuffing-box, et par celui de l'eau contre les parois des tuyaux et du corps de pompe ; il est diminué aussi par le poids et le frottement des soupapes, par les variations de direction et de vitesse que subit l'eau dans son parcours, et par la vitesse que conserve l'eau à sa sortie du tuyau d'ascension. Avec des pompes bien proportionnées, on peut obtenir PH = de 0,75 à 0,85 $\mathcal{T}_m$ ; mais il convient de ne compter que sur 0,75 $\mathcal{T}_m$ et même moins.

Langsdorf donne, pour l'expression du frottement de la garniture du piston,

$$n\mathrm{DH}'.$$

D diamètre du piston en mètres ;

$H'$ pression de l'eau sur le piston, exprimée en mètres de hauteur d'eau ;
$n$ coefficient égal à 7 pour les corps de pompe en laiton bien poli, à 15 pour ceux en fonte simplement forés, à 25 pour ceux en bois assez lisses, et à 50 pour ceux en bois dégradés par l'usage.

Comme on le voit, l'auteur de cette formule admet que le frottement est indépendant de la hauteur de la garniture (65). Ce frottement étant exprimé en kilogrammes, le travail qu'il absorbe en une seconde est

$$n\mathrm{DH'V} \text{ kilogrammètres.}$$

Pour des pompes bien construites et en très-bon état d'entretien, le volume d'eau élevé est égal à celui engendré par le piston diminué de 0,03 à 0,04 ; mais pour les pompes ordinaires, ce déchet va à 0,1 et même à 0,2. Des pompes, au lieu d'élever un volume d'eau moindre que celui engendré par le piston, ont donné un débit plus grand ; cela tient à ce que l'eau en mouvement continue encore sa marche après l'arrivée du piston à la fin de sa course ; ce qui ne peut avoir lieu qu'autant que la vitesse est grande, circonstance qu'il faut éviter.

Pour les épuisements des mines, on a quelquefois à élever l'eau à des hauteurs considérables. Une seule pompe peut le faire d'un seul jet, comme à Huelgoat (194) ; mais les clapets durent très-peu, et il convient qu'une même pompe n'élève l'eau qu'à une hauteur de 30 à 60 mètres ; pour des hauteurs plus considérables, on doit employer plusieurs pompes étagées sur la hauteur du puits. Des pompes établies à Illsang, en Bavière, par M. Reicheinbach, élèvent l'eau d'un seul jet à 356 mètres.

Pour les pompes mues à bras d'homme, la course du piston est de $0^m,30$ environ ; pour celles mues par des machines, elle est ordinairement de 1 mètre à $1^m,20$, quelquefois elle va à 2 mètres, et à Huelgoat elle est de $2^m,30$.

La vitesse du piston d'une pompe marchant régulièrement atteint rarement $0^m,30$ ; à Huelgoat, elle est cependant de $0^m,42$ ; mais il convient qu'elle soit comprise entre les limites $0^m,16$ et $0^m,24$.

Pour l'épuisement des mines de plomb du Bleyberg, on a établi deux machines, système Cornouailles, d'une puissance qui dépasse tout ce qui avait été fait, même en Angleterre.

Le piston à vapeur de chaque machine a $2^m,67$ de diamètre et une course de $3^m,66$.

Les pistons des pompes ont le même diamètre que ceux à vapeur ; mais seulement $2^m,86$ de course. Avec ces dimensions on a dû employer les soupapes à double siége ou à lanternes, qui sont beaucoup plus faciles à soulever, une partie de la pression de l'eau n'agissant pas sur la soupape.

Les machines peuvent donner facilement 7 levées par minute ; elles sont à haute pression, à détente et à condensation. En supprimant la détente, chaque machine pourrait donner une puissance de 700 à 800 chevaux.

Dans des expériences faites avec soin, la profondeur d'épuisement n'étant encore que de 71m,50, et la détente ayant lieu aux 0,19 de la course, l'effet utile moyen a été de 234 chevaux, et la consommation de combustible, de 1k,45 par cheval utile et par heure. Le volume d'eau élevé a été un peu supérieur à celui engendré par les pistons.

Pour les pompes à incendie, il y a deux pistons qui ont ordinairement 0m,12 de course, et qui ne s'élèvent, dans les mouvements les plus rapides, que 60 fois par minute, ce qui correspond à 0m,24 de vitesse. Les pistons, qui sont en bronze, ont environ 0m,60 de longueur et 0m,12 de diamètre. Le récipient d'air, que l'on place entre les deux corps de pompe, a ordinairement 0m,55 de hauteur sur 0m,25 de diamètre; il est destiné à rendre constant le jet d'eau. Le long ajutage ou *lance* qu'on dirige vers le feu à éteindre a environ 0m,016 de diamètre à l'orifice. Avec les proportions et la vitesse précédentes, huit pompiers obtiennent un jet de 26 mètres de hauteur (175).

Pour les grandes pompes, afin de rendre, autant que possible, le mouvement de l'eau constant dans la colonne d'ascension, et même dans celle d'aspiration quand elle est longue, il convient de munir chacune d'elles d'un récipient d'air placé à la partie inférieure; ces récipients ont encore l'avantage de rendre moins violents les chocs des soupapes.

Quand les eaux tiennent en suspension des corps étrangers, on garnit le bas du tube plongeur d'une caisse percée de petits trous, appelée *lanterne;* l'eau arrive dans la colonne d'aspiration en passant par ces petits trous où elle subit, en quelque sorte, une filtration.

**197.** *Presse hydraulique.* Quoique cette machine ne soit pas employée à élever l'eau, sa manière de fonctionner lui fait naturellement prendre place à côté des pompes. La pression théorique que peut transmettre le plateau fixé au grand piston d'une presse hydraulique est

$$Q = \frac{PLD^2}{ld^2}.$$

Q pression transmise;

P force motrice; un homme agissant sur un levier sans faire usage du poids de son corps donne moyennement P = 25 kilog., et même P = 50 kilog., si le travail n'est que d'un instant;

L bras de levier de la puissance P, ou distance du point d'application de cette force à l'axe de rotation de son levier;

D diamètre du grand piston;

*d* diamètre du petit piston;

*l* bras de levier de la résistance qu'oppose le piston au mouvement du levier de la puissance P; cette résistance est égale à la pression de l'eau sur le petit piston, ou encore à $P\frac{l}{L}$.

Supposant P = 25 kilog., L = 1m,00, D = 0m,20, $l = 0^m,03$ et $d = 0^m,03$, on a

$$Q = \frac{25 \times 1 \times 0.04}{0.03 \times 0.0009} = 37\,037 \text{ kil.}$$

Les diverses résistances passives de la machine, et surtout le frottement de la garniture, font que la pression réelle Q' que l'on peut obtenir en pratique n'est que les 0,80 de Q pour des efforts modérés; elle atteint les 0,85 de Q pour de grands efforts.

Le rapport de la vitesse du grand piston à celle du petit est égal au rapport inverse des sections ou des carrés des diamètres de ces pistons; pour l'exemple précédent, ce rapport est donc $\frac{d^2}{D^2} = \frac{0.0009}{0,04} = \frac{9}{400}$.

Les pistons sont pleins, et ils se meuvent dans un stuffing-box ordinaire dont les étoupes sont remplacées par des rondelles de cuir; la garniture du grand piston a $0^m,04$ de hauteur, et il convient, afin de la rendre bien étanche, de la disposer de manière que non-seulement la pression du stuffing-box l'applique, en l'élargissant, contre le piston et le renflement du corps de pompe, mais aussi qu'elle fasse fermeture autoclave.

On se rendrait compte du frottement de la garniture des pistons à l'aide, soit de la formule du n° 65, dans laquelle $f$ varierait de 1/5 à 1/6, soit de celle de Langsdorf (page 223).

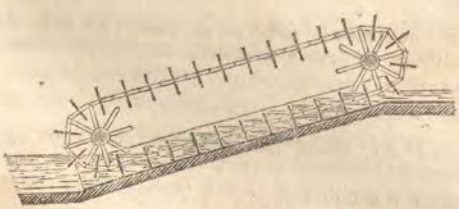
*Dimensions des presses à fourrage employées en Algérie et construites à Liverpool, ainsi que de celles qui ont servi à élever les tubes du pont Britannia.*

| | Algérie. | Britannia. |
|---|---|---|
| Diamètre D du piston. . . . . | $0^m,279\,5$ | $0^m,510$ |
| Diamètre intérieur du corps de pompe. . . . . | $0^m,309\,0$ | $0^m,560$ |
| Epaisseur de la fonte. . . . . | $0^m,154\,5$ | $0^m,153$ |
| Pression intérieure sur un centimètre carré. . . . . | $1078^k,7$ | $569^k,7$ |
| Pression sur toute la surface du piston. . . . . | $660\,140^k$ | $1\,161\,500^k$ |
| Effort de rupture des cylindres par millimètre carré. . | $12^k,26$ | $6^k,83$ |

La fonte travaillant à une charge voisine de celle de rupture (177), elle n'a résisté que parce qu'on l'a obtenue par un mélange de fontes choisies, et encore un cylindre d'Algérie s'est rompu brusquement de haut en bas.

**198.** *Chapelet incliné.* Cette machine se compose d'une série de palettes rectangulaires fixées à une chaîne sans fin, et se mouvant de bas en haut dans une auge inclinée en bois. Cette auge plonge dans le puisard et s'élève jusqu'à la hauteur à laquelle il convient de monter l'eau.

Fig. 42.



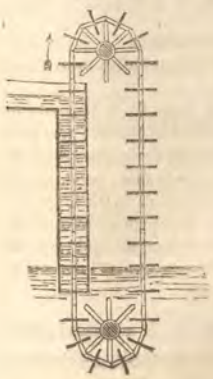
Le jeu laissé entre les

bords latéraux des palettes et les parois de l'auge est de $0^m,006$ environ. Pour une même section de palette, le développement de la partie de son contour en contact avec l'auge est minimum, ainsi que la quantité d'eau qu'elle laisse échapper, quand sa hauteur est moitié de sa longueur; cependant, dans la pratique, la hauteur est quelquefois les 4/5 de la longueur. L'écartement des palettes varie de 1 fois à 1 fois 1/2 leur hauteur, et leur vitesse, de 1 mètre à $1^m,50$ par seconde.

Un homme exerçant sur une manivelle un effort de 8 kilog. avec une vitesse de 0,75 par seconde peut produire, en 8 heures, un effet utile moyen équivalent à 80 ou 90 mètres cubes d'eau élevés à 1 mètre de hauteur; mais on ne doit compter en général que sur un effet utile égal aux 0,40 du travail dépensé; ce faible rendement fait que cette machine est à peu près abandonnée.

199. *Chapelet vertical.* Cette machine ne diffère de la précédente qu'en ce que l'auge inclinée est remplacée par un tuyau vertical, appelé *buse*, à section carrée ou cylindrique. Les palettes ont la même forme, et de $0^m,13$ à $0^m,16$ de côté ou de diamètre; leur jeu dans la buse est moins grand que pour les chapelets inclinés, et, afin de diminuer encore les pertes d'eau, on rend ce jeu le plus petit possible en plaçant au bas de la buse un tuyau métallique bien dressé, de la section des palettes et d'une longueur excédant un peu la distance de deux palettes consécutives. Souvent les palettes sont formées d'une rondelle en cuir gras serrée entre deux plaques de tôle; cette rondelle fait garniture et rend les pertes d'eau aussi petites que possible.

Fig. 43.



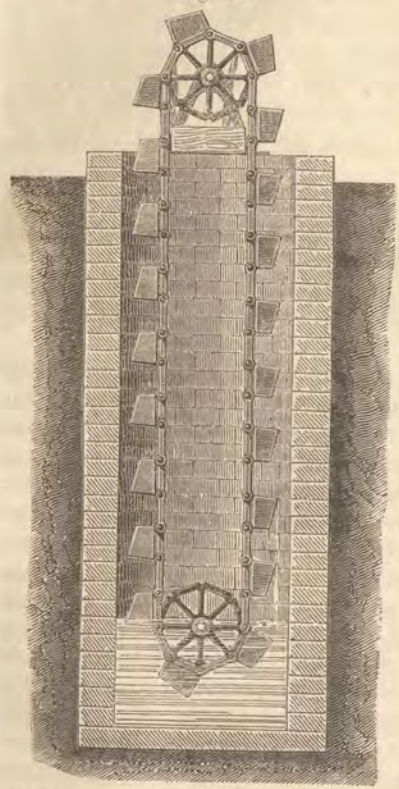
Le chapelet vertical convient surtout pour les épuisements où il faut élever l'eau à plus de 4 mètres de hauteur. La longueur de la buse est en général comprise entre 4 et 6 mètres.

On emploie de 4 à 8 hommes appliqués à des manivelles de $0^m,40$ de rayon, et faisant de 20 à 30 tours par minute, pour manœuvrer un chapelet. Ces hommes travaillant 8 heures par jour, et par relais de deux heures, produisent chacun un effet utile journalier équivalant à 110 ou 120 mètres cubes d'eau élevés à 1 mètre. En général on peut compter que l'effet utile moyen est égal aux 0,65 de l'effet dépensé, et que la quantité d'eau élevée est les 5/6 de l'eau d'abord puisée.

Les chapelets peuvent être mus non-seulement par des hommes, mais aussi par des chevaux à l'aide d'un manége, et même par des roues hydrauliques et des machines à vapeur.

**200.** *Noria.* Cette machine n'est autre chose qu'un chapelet vertical dans lequel la buse et les palettes sont remplacées par des seaux fixés à une chaîne sans fin, et dont la capacité est ordinairement de 7 à 8 litres et va quelquefois à 15 litres.

Fig. 44.



Dans une noria, afin que les seaux puissent se vider, on est obligé de monter l'eau à un niveau supérieur à celui auquel ou veut l'élever; de là il résulte que pour obtenir un travail utile $Ph$, on est obligé, abstraction faite des différentes résistances passives, de produire un travail,

$$P(h + h').$$

P poids d'eau élevé;
$h$ hauteur à laquelle on veut élever l'eau;
$h'$ excès de hauteur à laquelle on est obligé d'élever l'eau pour que les seaux versent à un niveau convenable; sa valeur est ordinairement égale à $0^m,75$; c'est le rayon du cercle circonscrit à l'exagone qui sert de tambour, augmenté de $0^m,10$ à $0^m,20$.

La valeur de $h'$ restant constante, quelle que soit celle de $h$, le rapport de l'effet utile au travail dépensé augmentera à mesure que la hauteur $h$ sera plus grande; c'est du reste ce que confirment les résultats pratiques du tableau suivant, obtenus avec une noria dans laquelle on avait $h' = 0^m,75$. La machine était mue par de forts ouvriers produisant sur des manivelles un effort de 9 kilog. avec une vitesse de $0^m,75$ à $0^m,80$ par seconde.

| Valeur de $h$. | Rapport de l'effet utile à l'effet dépensé. |
|---|---|
| $1^m,00$ à $2^m,00$ | 0,48 |
| 2 ,50 à 2 ,60 | 0,57 |
| 3 ,00 à 3 ,30 | 0,63 |
| 3 ,60 à 4 ,00 | 0,66 |

Une bonne noria, établie par M. Abadie, près de Toulouse, a pour tambour une lanterne à 6 fuseaux en fer de $0^m,03$ de diamètre; ces fuseaux sont espacés de $0^m,45$ et relient deux plateaux en fonte dont

l'écartement est de $0^m,43$. L'axe du tambour est en fer, et a $0^m,054$ d'équarrissage. La chaîne a $13^m,72$ de longueur, et elle est formée de 28 chaînons portant chacun un seau en feuilles de cuivre de 15 litres de capacité.

La surface du bassin qui reçoit l'eau est à $0^m,07$ au-dessous de l'axe du tambour, et à $5^m,13$ au-dessus du niveau de l'eau dans le puisard. Un cheval ordinaire de jardinier fait fonctionner cette machine, et produit un effet utile équivalent à 118 mètres cubes d'eau élevés à un mètre de hauteur par heure; admettant, avec M. d'Aubuisson, que dans ce même temps le travail produit par un cheval attelé à un manége équivaut à 144 mètres cubes d'eau élevés à un mètre, l'effet utile est donc les 0,82 du travail dépensé.

D'après Navier, une noria manœuvrée par deux chevaux aurait élevé 70,12 mètres cubes d'eau à $3^m,60$ de hauteur, ce qui équivaut à 126 mètres cubes à 1 mètre par cheval; l'effet utile serait donc les 0,88 du travail dépensé. Il convient de ne compter que sur un effet utile égal aux 0,70 ou 0,80 du travail dépensé.

Outre l'effet utile considérable rendu par la noria, elle a encore l'avantage de pouvoir servir à élever les eaux bourbeuses, comme le sont généralement les eaux d'épuisement, ce qui est impossible avec les chapelets.

**201.** *Roues élévatoires.* Ces roues, qui sont à palettes planes, agissent à la manière des chapelets, mais en se mouvant dans un coursier circulaire. Nous nous contenterons de donner les dimensions des parties principales de celle qui a été établie pour élever les eaux de la Seine dans la gare de Saint-Ouen.

| | |
|---|---|
| Diamètre extérieur de la roue. . . . . | $10^m,672$ |
| Diamètre intérieur. . . . . | $10^m,672 - 1^m,648 = 9^m,024$ |
| Longueur des aubes. . . . . | $1^m,216$ |
| Hauteur des aubes, mesurée suivant ces aubes, qui sont un peu inclinées sur le rayon. . . . . | $0^m,90$ |
| Hauteur des aubes, mesurée suivant le rayon. . | $0^m,824$ |
| Nombre d'aubes. . . . . | 36 |

D'après des observations faites par M. Walter de Saint-Ange, cette roue élève 2500 mètres cubes d'eau à 4 mètres de hauteur en une heure; la force de la machine étant supposée être de 45 chevaux, le rapport de l'effet utile à l'effet dépensé est 0,82: mais il eût été convenable d'évaluer exactement la force de la machine.

**202.** *Roues à seaux ou à godets.* Ces roues, employées fréquemment aux irrigations et aux usages domestiques à cause de leur grande simplicité et de leur peu d'entretien, sont à aubes planes, dont un plus ou moins grand nombre portent des coffres fermés aux deux extrémités, et garnis sur une face d'une ouverture qui permet l'entrée et la sortie de l'eau. Par le mouvement de la roue, les coffres puisent successive-

ment l'eau dans le courant moteur même, et viennent la verser dans une auge placée latéralement vers le sommet de la roue.

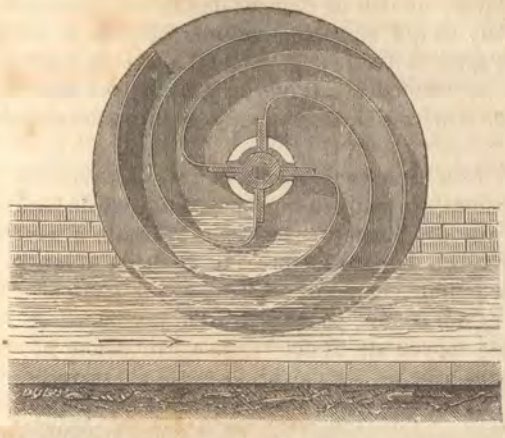
Les coffres, à moins de régler convenablement leur ouverture, perdent toujours à leur sortie du courant une partie de l'eau d'abord puisée; de plus, le versement ne s'opère qu'à un niveau supérieur au point auquel on doit élever l'eau. C'est afin d'atténuer autant que possible ces causes de pertes d'effet utile, que dans l'application de ces roues aux grands épuisements, on a remplacé les coffres fixés aux aubes par des seaux ou godets mobiles autour d'un axe placé au-dessus de leur centre de gravité; par cette disposition, les godets ne perdent leur eau qu'au sommet de la roue où un taquet les fait verser.

Comme, pour les épuisements, l'eau élevée n'est pas prise dans le courant moteur, les godets sont montés sur une roue séparée de la roue motrice et formée de deux plateaux suffisamment écartés pour que les godets puissent être suspendus entre eux. Perronet a appliqué avec beaucoup de succès une machine semblable aux fondations du pont de Neuilly. Le diamètre de la roue motrice était $5^m,85$, la longueur des aubes $6^m,50$, la hauteur des aubes $0^m,97$, et le diamètre des roues à godets $5^m,36$. La roue à aubes avait été placée en un point fixe où la vitesse du courant était de $0^m,81$, et la roue à godets a été successivement portée sur les emplacements des diverses piles jusqu'à une distance de 35 mètres. La capacité de chacun des seize godets montés sur la roue était de 137 litres; mais la quantité d'eau qui arrivait au point de versement n'était que de 103 litres. La quantité d'eau élevée à $3^m,25$ et $3^m,90$ de hauteur était de 185 mètres cubes par heure; c'est le même effet utile que celui fourni par douze chapelets verticaux employés au même pont.

**203.** *Tympan.* La machine de ce nom, employée par les anciens, était simplement un tambour en bois divisé en huit ou en un plus grand nombre de compartiments par des cloisons dirigées suivant le rayon. Chaque compartiment portait, sur le contour du tambour, une ouverture qui permettait à l'eau d'entrer dans le compartiment quand cette ouverture était noyée. Comme cette ouverture était placée sur la partie de la paroi convexe du tambour qui sortait la première de l'eau, une certaine quantité d'eau se trouvait emprisonnée, et le tambour en tournant l'élevait jusqu'à la hauteur de son axe. Des rainures pratiquées suivant la longueur de l'axe et se prolongeant dans un des fonds du tambour formaient des canaux qui permettaient à l'eau de sortir.

Lafaye, au commencement du siècle dernier, a imaginé de courber les cloisons suivant les développantes du cercle extérieur de l'axe (*Int.*, 1144); ce qui a permis de supprimer l'enveloppe convexe du tambour. Par cette disposition, la verticale passant par le centre de gravité de la masse d'eau contenue dans chaque canal courbe est tangente à l'axe, et, quelle que soit la position du tympan, le rayon de

Fig. 45.



son axe est le bras de levier constant de la résistance; d'où il résulte que le travail est aussi régulier que possible. D'après des expériences de Perronet, un de ces tympans, ayant $5^m,85$ de diamètre, portant 24 cloisons et plongeant de $0^m,24$ dans l'eau, faisait deux tours et demi par minute et élevait 123 mètres cubes d'eau à $2^m,60$ par heure. La machine était mue par douze hommes marchant sur une roue à chevilles montée sur son axe; d'où il résulte un effet utile équivalent à 26,67 mètres cubes d'eau élevés à un mètre de hauteur par heure et par homme. Avec un chapelet vertical, manœuvré, il est vrai, à l'aide de manivelles (37), cet effet utile n'a été que de 17,40 mètres cubes. Cette machine, qui peut aussi être mue par une roue hydraulique, a l'inconvénient de n'élever l'eau qu'à la hauteur de son axe; ce qui oblige de lui donner des dimensions qui la rendent lourde et embarrassante.

Dans ces derniers temps, M. Cavé a construit plusieurs tympans de très-grandes dimensions, complétement en tôle de $3^{mm},5$ environ d'épaisseur rivée sur des cornières en fer, avec arbre en fer ou en fonte.

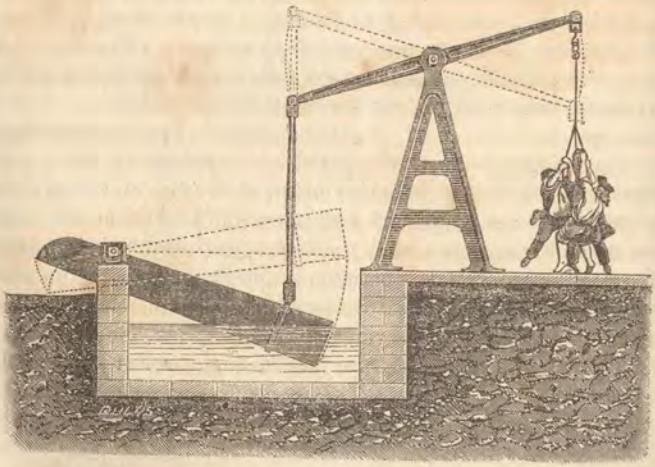
M. Cavé a fait des tympans à 4 cloisons courbées en spirale d'Archimède; mais les derniers sont à 2 cloisons, et les spires se rapprochent du centre plus rapidement que dans la spirale, assez pour que la surface de l'eau qui y est emprisonnée reste constamment tangente à la spire supérieure. Un de ces tympans à deux spires, fonctionnant dans de bonnes conditions, avait les proportions suivantes :

| | |
|---|---|
| Plus grand rayon. . . . . | $3^m,50$ |
| Largeur intérieure. . . . . | $1^m,00$ |
| Plus courte distance de l'extrémité de chaque spire à la spire voisine. . . . . | $0^m,75$ |
| Diamètre des ouvertures laissant sortir l'eau. . . . . | $1^m,00$ |
| Profondeur à laquelle la roue plonge. . . . . | $1^m,00$ |
| Nombre de révolutions de chaque spire. . . . . | 2 |
| Mètres cubes d'eau puisés par chaque spire pour un tour. . | $2^m,00$ |
| Nombre de tours par minute. . . . . | 10 ,00 |
| Mètres cubes d'eau élevés par heure. . . . . | $2400^m,00$ |
| Hauteur à laquelle l'eau est élevée, environ. . . . . | $2^m,00$ |

Pour un débit aussi considérable, on fait verser l'eau par les deux joues du tympan, lequel, au lieu de plonger de 1 mètre, plonge souvent de $1^m,20$ à $1^m,30$, ce qui augmente considérablement le volume d'eau élevé. Ainsi, d'après M. Cavé, le tympan faisant de 10 à 12 révolutions par minute, ce volume aurait été de 3333 mètres cubes par heure, à la hauteur de 2 mètres environ, pour une puissance moyenne de 30 chevaux.

**204.** *Baquetage à bras.* Des épuisements de peu de durée, et qui doivent être faits de suite, s'exécutent quelquefois à l'aide de seaux ou baquets manœuvrés par des hommes placés dans le bassin à mettre à sec. D'après Perronet, un homme n'élève que 68 litres d'eau à un mètre de hauteur par minute, et moitié seulement si la hauteur d'élévation est de $1^m,80$ ; ce qui donne, pour un travail journalier de huit heures, un effet utile moyen de $31\,000^{km}$; M. Morin donne $46\,000^{km}$ quand l'homme travaille avec un seau léger, $48\,000^{km}$ s'il travaille avec une écope ordinaire, et $120\,000^{km}$ si c'est avec une écope hollandaise. Comme on le voit, l'écope hollandaise, *fig.* 46, est une machine très-avantageuse; mais que l'on ne peut employer que pour élever de grands volumes d'eau à de petites hauteurs.

Fig. 46.



**205.** *Seau à bascule.* Lorsqu'on n'a à élever, dit M. d'Aubuisson, qu'une petite quantité d'eau de 5 à 6 mètres de profondeur, pendant une ou deux heures de la journée, on emploie avec avantage un seau suspendu à une des extrémités d'un grand balancier en bois, à l'autre extrémité duquel on place un poids faisant équilibre à la charge. De

cette manière, un homme, selon l'habitude qu'il a de ce genre de travail, produit un effet équivalent à 12 ou 15 et même 20 mètres cubes d'eau élevés à un mètre de hauteur par heure. M. Morin donne seulement, par homme, pour un travail journalier de huit heures, 60 000$^{km}$ quand le puits a de 2 à 3 mètres de profondeur, et 70 000$^{km}$ si cette profondeur est de 4 à 5 mètres.

**206.** *Seau manœuvré à l'aide d'un treuil.* Lorsque la profondeur du puits est considérable, on fait usage d'une corde, à chacune des extrémités de laquelle est fixé un seau, et s'enroulant sur le treuil dont il a été parlé au n° 124. M. d'Aubuisson, d'après ses observations et des résultats donnés par Coulomb, admet que, le treuil étant manœuvré par des hommes agissant sur des manivelles, chaque homme produit, dans un travail journalier de huit heures, un effet utile de 160 000$^{km}$.

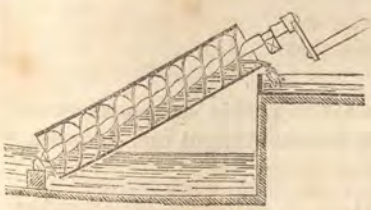
Lorsque la corde passe seulement sur une poulie, et qu'elle est directement tirée à mains d'homme, d'après Coulomb, l'effet utile journalier n'est que de 71 000$^{km}$.

**207.** *Manége du maraîcher.* Cette machine, qui a la plus grande analogie avec la précédente, se compose d'un tambour, fait généralement avec deux vieilles roues de voiture, sur le pourtour desquelles on a fixé des douves de tonneau allant de l'une à l'autre sans être parallèles à l'axe; ce qui donne une espèce d'hyperboloïde de révolution, qui empêche la corde de s'échapper, tout en donnant un treuil régulateur (124). Ce tambour est monté sur l'arbre vertical d'un manége, que l'on maintient par une charpente qui sert en même temps à fixer sur le puits deux poulies sur lesquelles viennent passer les deux brins de la corde (128 et 129).

Hachette rapporte, dans son traité des machines, qu'avec un manége de maraîcher, établi sur un puits de 32$^{m}$,50 de profondeur, un cheval élevait par minute un seau contenant 90 litres d'eau, d'où il résulte que pour huit heures de travail l'effet utile serait de 1 404 000$^{km}$; mais si la durée du travail était de huit heures par jour, cet effet utile serait diminué (37).

**208.** *Vis d'Archimède.* Dans les vis ordinaires employées aux épuisements, on place trois hélices sur le même noyau (*Int.*, 1167). Le diamètre extérieur des hélices est égal à trois fois celui du noyau, et il varie entre 0$^{m}$,325 et 0$^{m}$,65. La longueur de la vis varie entre douze et dix-huit fois le diamètre extérieur des hélices, selon que ce diamètre est plus ou moins fort.

Fig. 47.



Les constructeurs de Paris font ordinairement égal à 60° l'angle de

la tangente à l'hélice tracée sur le noyau avec la génératrice de ce noyau ; les anciens Romains le faisaient de 45° ; à Toulouse on l'a pris de 54° environ, et Eytelwein l'a fait de 78° dans une petite vis de construction soignée, destinée à faire des expériences.

L'inclinaison de l'axe de la vis avec l'horizon peut varier de 30° à 45°, et la vis fonctionne le plus avantageusement lorsque le niveau de l'eau s'élève un peu au-dessus du centre de la base du noyau, sans immerger complétement cette base.

*Résultats obtenus par M. Lamandé, avec une vis d'Archimède ayant les dimensions suivantes :*

| | |
|---|---|
| Longueur de la vis. . . . . | $5^m,85$ |
| Diamètre extérieur. . . . . | $0^m,49$ |
| Inclinaison de la vis à l'horizon. . . . . | 35° |
| Nombre de tours de la vis par minute. . . . . | 40 |
| Hauteur à laquelle l'eau était élevée. . . . . | $3^m,30$ |
| Quantité d'eau élevée à $3^m,30$ par heure. . . . . | $45^{m}$ cub. |

Comme la vis était manœuvrée par deux compagnies de chacune neuf hommes, travaillant par relais de deux heures, l'effet produit était donc équivalent à $16^{mc},50$ d'eau élevés à 1 mètre de hauteur, par heure et par homme. Comme la durée du travail journalier n'était que de cinq heures, on voit que l'effet utile journalier était très-faible.

On peut admettre qu'un ouvrier manœuvrant une vis d'Archimède bien disposée, peut produire un effet utile équivalant à 15 mètres cubes d'eau élevés à 1 mètre de hauteur par heure, et travailler six heures par jour ; il peut même travailler huit heures sur vingt-quatre si l'épuisement est continu et les relais bien disposés.

En Hollande et en Allemagne on remplace souvent le canon, c'est-à-dire l'enveloppe extérieure des hélices, par un coursier demi-circulaire fixe. Par cette disposition, le poids du canon et celui de l'eau qui se trouve dans la vis ne reposent plus sur les pivots, et ne tendent pas à produire directement la flexion du noyau ; mais il faut marcher avec une grande vitesse, pour que la perte d'eau entre les hélices et le coursier ne soit pas considérable. Ces machines sont presque toujours mues par des moulins à vent.

## MOULINS A VENT.

**209.** *Moulins à vent.* La pression exercée par le vent contre une surface plane normale à la direction de son mouvement est, pour des vitesses inférieures à 10 mètres par seconde,

$$P = 0{,}11 d s^{1,1} v^2, \qquad (a)$$

ou à peu près

$$P = ds \times 2h.$$

P pression en kilogrammes;
$d$ poids d'un mètre cube de l'air en mouvement;
$s$ surface de la plaque en mètres carrés;
$v$ vitesse du vent en mètres par seconde, ou vitesse relative de choc de l'air contre le disque si l'un et l'autre sont en mouvement (*Int.*, 1356);
$h = \frac{v^2}{2g}$ hauteur génératrice de la vitesse $v$ (19).

La première valeur de P fait voir que la pression croît dans un rapport plus grand que la surface choquée. D'après Borda, trois plaques, dont les surfaces étaient entre elles comme les nombres 1, 2,25 et 5.06, ont donné des pressions qui étaient entre elles comme les nombres 1, 2,44 et 5,97; valeurs qui croissent à peu près comme les puissances 1,1 des surfaces (*Int.*, 483 et 485).

Lorsque le vent frappe une surface suivant un certain angle, la pression qu'il exerce sur cette surface, dans la direction de son mouvement, est, d'après Hutton,

$$0{,}11 ds^{1{,}1} v^2 (\sin i)^{1{,}84 \cos i}. \qquad (b)$$

$i$ angle qui fait la direction du vent avec la surface.
Les autres lettres ont les mêmes significations que dans le cas précédent.

Si l'angle $i$ est droit, on a $\cos i = 0$, $\sin i = 1$, d'où $(\sin i)^{1{,}84 \cos i} = 1$, et la formule $(b)$ n'est plus autre chose que la formule $(a)$; ce qui devait être.

*TABLEAU des pressions exercées par le vent à différentes vitesses contre une surface d'un mètre carré, choquée directement, d'après la formule (a).*

| DÉSIGNATION DES VENTS. | VITESSE par seconde. | PRESSION par mètre carré. |
|---|---|---|
| | m. | k. |
| Vent faible | 2.00 | 0.54 |
| Vent frais ou brise (tend bien les voiles) | 6.00 | 4.87 |
| Vent le plus convenable aux moulins | 7.00 | 6.64 |
| Bon frais (convenable pour la marche en mer) | 9.00 | 10.97 |
| Grand frais (fait serrer les hautes voiles) | 12.00 | 19.50 |
| Vent très-fort | 15.00 | 30.47 |
| Vent impétueux | 20.00 | 54.16 |
| Tempête | 24.00 | 78.00 |
| Tempête violente | 30.05 | 122.28 |
| Ouragan | 36.15 | 176.96 |
| Grand ouragan | 45.30 | 277.87 |

Les résultats de ce tableau supposent la pression barométrique égale à $0^m,755$ de mercure, et la température égale à 12°; ce qui donne $d = 1^k,231$. Quand $s = 1$, on a aussi $s^{1{,}1} = 1$.

Un vent dont la vitesse est inférieure à 4 mètres par seconde n'est pas suffisant pour qu'un moulin à vent puisse moudre le blé, et si la vitesse dépasse 8 mètres, on est obligé de commencer à serrer les voiles.

D'après Smeaton, un moulin à vent donne le maximum d'effet quand ses ailes sont des surfaces gauches dont les génératrices, situées aux points obtenus en divisant la longueur de l'aile en 6 parties égales, font avec l'axe de la roue ou la direction du vent les angles désignés dans le tableau suivant. (La génératrice n° 1 est celle qui se trouve au point de division le plus rapproché de l'axe ; c'est en ce point que commence la voilure.)

| NUMÉROS des génératrices. | ANGLES avec l'axe. | ANGLES avec le plan du mouvement des ailes. | OBSERVATION. |
|---|---|---|---|
| 1 | 72° 00 | 18° 00 | Les angles de la seconde et de la troisième colonnes sont complémentaires. |
| 2 | 71 00 | 19 00 | |
| 3 (milieu de l'aile.) | 72 00 | 18 00 | |
| 4 | 74 00 | 16 00 | |
| 5 | 77 50 | 12 50 | |
| 6 | 83 00 | 7 00 | |

Une différence de quelques degrés avec les valeurs du tableau est sans influence sur l'effet produit.

La largeur de l'aile est ordinairement comprise entre le 1/5 et le 1/6 de la longueur, et elle n'en doit jamais dépasser le 1/4.

L'aile, au lieu d'être rectangulaire, a quelquefois la forme d'un trapèze, dont le côté parallèle situé à l'extrémité de l'aile est égal au 1/3 de la longueur de l'aile et à 1,66 fois le côté parallèle intérieur ; le côté parallèle extérieur est divisé par l'axe de l'aile en deux parties, qui sont dans le rapport 5:3. L'un des grands côtés du trapèze est parallèle au bras de l'aile. Il convient du reste de disposer les divers éléments de l'aile trapézoïdale en surface gauche, comme pour l'aile rectangulaire.

D'après Smeaton, les ailes d'un moulin à vent étant bien airées, lorsqu'elles marchent sans charge, la vitesse de leur extrémité est égale à 4 fois celle du vent, et cette vitesse doit être égale à 2,5 ou 2,7 fois celle du vent pour que le moulin rende le maximum d'effet.

Smeaton conclut aussi de ses expériences que les charges sont à peu près proportionnelles aux carrés des vitesses du vent ; ainsi les vitesses étant dans le rapport de 1 à 2, les charges ont crû dans celui de 1 à 3,75. De là, il résulte que les effets produits sont à peu près dans le rapport des cubes des vitesses du vent ; c'est aussi ce que confirment les expériences de Smeaton, dans lesquelles les vitesses étant dans le rapport de 1 à 2, les effets ont été dans celui de 1 à 7,02.

L'effet dynamique en kilogrammètres par seconde d'un moulin à vent est assez bien représenté par l'expression

$$nSV^3.$$

$n$ coefficient qui est égal à 0,05 d'après des expériences rapportées par Smeaton, où l'on avait $S = 0^{m.c.},2607$; des expériences faites par Coulomb, sur un grand moulin à vent construit aux environs de Lille, ont donné $n = 0,03$. Dans les cas ordinaires de la pratique, il conviendra d'adopter cette dernière valeur de $n$, en ne considérant toutefois les résultats fournis par la formule que comme des approximations;

S surface des quatre ailes en mètres carrés;

V vitesse du vent en mètres par seconde.

L'expression de l'effet utile rendu par un moulin à vent est la même que pour celui rendu par une roue pendante (188); la différence ne consiste que dans la valeur du coefficient numérique.

*Dimensions des parties principales d'un moulin à vent.*

| | |
|---|---|
| Equarrissage de l'arbre | $0^m,50$ à $0^m,60$ |
| Inclinaison de l'arbre à l'horizon | 10° à 15° |
| Longueur des ailes, mesurée depuis l'axe de rotation | 10 à 12 mètres. |
| Équarrissage des axes des ailes près de l'arbre | $0^m,30$ |
| Espacement des petits barreaux implantés dans l'axe de l'aile et sur lesquels on étend les voiles | $0^m,40$ |
| Surface ordinaire de chaque aile | 20 mètres carrés. |

Dans plusieurs localités, on rencontre des moulins à vent de 2, 3, et même 4 paires de meules pour moudre le blé, avec tous les appareils de nettoyage et de blutage.

M. Herpin a fait établir dans le département de l'Indre un moulin à vent de trois paires de meules de différents diamètres, et disposé pour faire fonctionner une scie circulaire et une huilerie, et à côté, sous un hangar, une machine à battre.

M. Herpin a fait remplacer la voilure ordinaire, qui était difficile à manœuvrer, par la voilure en planches mobiles du système Berton.

| | |
|---|---|
| Hauteur du centre de rotation des ailes au-dessus du sol | $14^m,80$ |
| Diamètre au bas de la tour, qui est octogonale et formée par 8 poteaux en bois de $12^m$ de hauteur reposant sur des dés en pierre de $1^m$ de hauteur | $8^m,00$ |
| Diamètre de la tour, au sommet des poteaux | $5^m,50$ |
| Distance du centre de rotation à l'extrémité des ailes | $10^m,00$ |
| Longueur des planches formant voilures | $8^m,00$ |

Chaque voilure est composée de 11 planches en sapin de $0^m,01$ d'épasseur, $0^m,25$ la largeur, et $8^m$ de longueur, qui peuvent se rapprocher plus ou moins, à la manière des deux branches de la règle parallèle du dessinateur, de manière à former un parallélogramme plus ou moins large. Les ailes sont planes et ont une largeur qui peut varier

de 2m à 2m,50. Le plan des ailes fait un angle d'environ 18° avec le plan du mouvement. Les meules et accessoires marchent le plus convenablement quand la volée, ayant toute sa voilure, fait 11 à 12 tours par minute, ce qui correspond à une vitesse d'environ 5 à 6 mètres par seconde pour le vent.

La construction de ce moulin est revenue à 19 600 fr.

M. Herpin estime que l'on peut moudre et bluter au moins 2500 hectolitres de blé par année; mais, exploité pour son compte par des gens qui prennent plus ou moins ses intérêts, le produit n'a guère dépassé 2000 hectolitres.

100 kilogrammes de blé froment de deuxième qualité, pesant 72 kilogrammes l'hectolitre, ont donné, dans une expérience faite par M. Herpin :

| | |
|---|---|
| Farine plus ou moins blanche. . . . . | 72k,600 |
| Farine bise. . . . . | 6 ,800 |
| Recoupes. . . . . | 4 ,200 |
| Sons. . . . . | 15 ,700 |
| Déchet. . . . . | 0 ,700 |
| Total. . . . . | 100 ,000 |

**210.** *Travail d'un moulin à vent appliqué à une huilerie ou employé à la mouture du blé, et travail des moulins à blé ordinaires.* Les expériences de Coulomb, citées au n° précédent, ont été faites sur un moulin à vent faisant marcher les pilons d'une huilerie. Les cames sont montées sur l'arbre du moulin; elles communiquent directement le mouvement à 5 pilons pesant chacun 510 kilogrammes destinés à broyer la graine de colza, et à deux autres pesant chacun 250 kilog. destinés à serrer et desserrer les coins qui séparent, par compression, l'huile de la gangue. Il n'y a jamais qu'un de ces derniers pilons qui marche à la fois; mais les 5 autres fonctionnent simultanément quand le vent le permet. L'élévation verticale des pilons est de 0m,49, et chacun de ceux mis en mouvement s'élève deux fois par tour du moulin.

*TABLEAU des résultats fournis par trois expériences de Coulomb.*

| VITESSE DU VENT par seconde. | NOMBRE DE TOURS par 1'. | POIDS ÉLEVÉ A 0m,49 par tour. | EFFET UTILE par 1'. |
|---|---|---|---|
| m. | | k. | k. m. |
| 2.27 | 3 | 1020 | 1499 |
| 4.06 | 7,5 | 2540 | 9334 |
| 6.50 | 13 | 5600 | 35672 |

A la vitesse de 6m,50, on marche avec toutes les voiles sans que la

machine se fatigue; mais passé cette limite, on commence à carguer les voiles.

L'effet utile en chevaux-vapeur transmis par l'arbre du moulin dans la troisième expérience est, en négligeant les frottements et les chocs des pilons (96), $\frac{35672}{4500} = 7{,}9$ chevaux. La surface utile de chaque aile ayant 10 mètres de longueur sur $1^m{,}95$ de largeur, ce qui fait 78 mètres carrés pour les 4 ailes, la surface de voilure est donc de 10 mètres carrés environ par force de cheval. Dans la deuxième expérience, cette surface était de 40 mètres carrés environ.

Un relevé du travail de plusieurs années a fait voir que chaque moulin fabrique moyennement 40 000 kilogr. d'huile par an. Le travail transmis aux pilons par 100 kilogr. d'huile fabriqués étant de 14 000 à 15 000 grandes unités dynamiques (34), en admettant avec Coulomb que les frottements et les chocs des pilons absorbent le 1/6 environ du travail transmis à ces pilons. Il en résulte que la fabrication seule de 100 kilog. d'huile exige moyennement 12 000 grandes unités dynamiques. M. Morin rapporte que les meules d'un moulin à huile pesant 3000 kilog., l'arbre vertical faisait 6 tours par minute, le poids de graine chargé à chaque rechange de 10′ était de 25 kilog., le poids de la graine broyée en un jour était de 1500 kilog., et la quantité d'huile fabriquée en 12 heures, 600 kilog. Le travail transmis par l'arbre moteur étant de 205 kilogrammètres par seconde, il en résulte que, par ce procédé, la fabrication de 100 kilog. d'huile n'absorbe que 1476 grandes unités dynamiques, c'est-à-dire le 1/10 environ de celui absorbé par l'emploi des pilons.

D'après Coulomb, on peut admettre que le travail annuel d'un moulin à vent n'est que le 1/3 environ de celui qu'il produirait en marchant d'une manière continue dans les conditions les plus favorables, c'est à-dire sous l'action d'un vent de $6^m{,}50$ à 7 mètres de vitesse par seconde.

Coulomb ayant soumis à l'expérience un moulin à blé dont la meule faisait 5 tours pour une révolution des ailes, il a reconnu que le mouvement ne commençait à avoir lieu que quand la vitesse du vent atteignait 4 mètres, et que cette vitesse ayant atteint $5^m{,}80$, les ailes faisaient de 11 à 12 tours par minute, et la quantité de blé moulu sans être bluté était de 400 à 450 kilog. à l'heure.

Hachette rapporte que dans un moulin de Corbeil, mû par une roue à aubes transmettant 1321 grandes unités dynamiques par heure, la meule ayant 2 mètres de diamètre, et faisant 67 révolutions par minute, la quantité de farine brute (son et farine mélangés) produite a été de 200 kil. en une heure 15 minutes. Ce résultat prouve que Coulomb a dû se tromper dans l'évaluation du blé moulu par un moulin à vent.

Des résultats de Hachette, il résulte que la mouture à la grosse de 100 kilog. de blé absorbe 825 grandes unités dynamiques.

M. d'Aubuisson conclut, des résultats obtenus par différents observateurs, que la force que doit transmettre l'arbre d'une roue hydraulique commandant un moulin est au moins de 3 chevaux par hectolitre de blé de 75 kilog. à moudre par heure; c'est 1080 grandes unités dynamiques par 100 kilog. de blé.

Les meules le plus généralement adoptées aujourd'hui en France, dans les moulins à l'anglaise, ont $1^m,30$ de diamètre et $0^m,27$ d'épaisseur; elles sont percées à leur centre d'un trou de $0^m,27$ à $0^m,33$ de diamètre, appelé *œillard*. La profondeur des rayons n'est pas de plus de 5 à 6 millimètres; ils sont formés en plan incliné, afin de présenter d'un côté une arête tranchante qui coupe les grains de blé, pour en faciliter le broiement complet. On a généralement reconnu qu'une vitesse de 110 à 120 révolutions par minute était convenable pour des meules de $1^m,30$; au-dessus, on a à craindre l'échauffement de la farine.

Dans les usines bien organisées des environs de Paris, rapportent MM. Cartier et Armengaud, les meules de $1^m,30$ de diamètre, faisant 115 à 120 révolutions par minute, ne moulent en moyenne que 15 à 16 hectolitres de blé en 24 heures, en produisant, il est vrai, de 60 à 63 pour 100 de cette farine première si recherchée par la boulangerie parisienne. La force nécessaire par paire de meules dans ces conditions, y compris nettoyage et blutage, est de deux chevaux et demi (le produit est moyennement de 20 à 22 kilog. par force de cheval et par heure). Ainsi, pour une puissance effective de 15 chevaux, on établira 6 paires de meules, y compris celle qui peut être en rhabillage, et cette opération s'effectuant à peu près régulièrement tous les 5, 6 ou 7 jours au plus, sur les 6 paires, il y en aura donc presque constamment une d'arrêtée. Un bon meunier s'arrange du reste pour que cette opération soit bien et promptement exécutée, et autant que possible pendant le jour.

Dans un grand nombre de localités, comme Lyon et Dijon, on rapproche moins les meules qu'à Paris; elles produisent plus de rondes ou de secondes que de premières; on leur fait alors moudre 24 à 25 hectolitres de blé en 24 heures, et même plus, et chaque paire de meules absorbe la force de 3 chevaux (le produit est de 25 à 26 kilogrammes par force de cheval et par heure).

Pour les manutentions militaires, les meules travaillant encore moins rapprochées, et le nettoyage et le blutage étant moins parfaits, chaque paire moud de 30 à 32 hectolitres en 24 heures et exige une puissance effective de 3 chevaux et demi (le produit correspond à 28 ou 30 kilog. par force de cheval et par heure).

Dans les moulins des États-Unis d'Amérique, les meules ont généralement $1^m,50$ de diamètre, font 100 tours par minute, et, d'après les

observations d'Évans, la quantité de blé moulue est de 1,76 hectolitre par heure, et la force du moteur de 3 chevaux par hectolitre.

Dans un moulin à l'anglaise des environs de Paris, le relevé d'une mouture de 3520 setiers de blé pesant ensemble 417452 kilog. a donné les résultats suivants :

| | |
|---|---|
| Farines, 1re et 2e qualité. . . . . | 0,720 |
| *Id.*, 3e et 4e. . . . . | 0,023 |
| Criblures. . . . . | 0,007 |
| Issues diverses. . . . . | 0,215 |
| Déchets, évaporations, balayures. . . . . | 0,035 |
| Total. . . . . | 1,000 |

Aujourd'hui, les constructeurs livrent le mécanisme d'un moulin tout posé, avec la roue hydraulique, mais sans aucun frais de transport, pour 4500 à 5000 fr. par paire de meules.

**211.** On distingue trois espèces de moutures :

1° *Mouture économique ou française.* C'est celle encore employée dans les petites usines de nos campagnes. Les meules ont 2 mètres de diamètre, et elles font de 55 à 60 tours par minute. Le blé est introduit dans l'ouverture de la meule supérieure au moyen d'une trémie constamment agitée. En sortant des meules, que l'on tient assez espacées pour que le grain soit seulement concassé, la mouture est séparée par le bluteau, en farine dite de blé, qui traverse le tissu, en gruaux, qui traversent plus loin, et en son volumineux et léger. Ces premiers gruaux sont de nouveau soumis à l'action des meules, que l'on tient alors plus rapprochées, et ils fournissent une farine de premier gruau et des seconds gruaux, qui donnent à leur tour une farine de 2e gruau et des 3es gruaux. Enfin, ceux-ci produisent des farines bises de 3e gruau, et un 4e gruau, qui produit une farine de 4e gruau, et des issues, appelées remoulages ou recoupes, qui contiennent les parties dures et grisâtres avoisinant l'enveloppe des grains.

Pour ces 5 opérations, 100 kilog. de blé donnent en moyenne les résultats suivants :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Farines blanches. | 1re opération : | Farine dite de blé. . . . | 38k,33 | 66k,00 |
| | 2e *Id.* | Farine dite de 1er gruau. | 19 ,16 | |
| | 3e *Id.* | Farine dite de 2e gruau. | 8 ,51 | |
| Farines bises. . . | 4e *Id.* | Farine dite de 3e gruau. | 5 ,00 | 8 ,33 |
| | 5e *Id.* | Farine dite de 4e gruau. | 3 ,33 | |
| Issues. . . . . | Son gros et petit. . . . . | | 10 ,82 | 23 ,32 |
| | Recoupes. . . . . | | 6 ,80 | |
| | Recoupettes. . . . . | | 5 ,70 | |
| | Déchet, évaporation, perte. . . . . | | | 2 ,35 |
| | Total. . . . . | | | 100k,00 |

Les blés durs, demi-durs et tendres se traitent également bien par cette méthode.

2° *Mouture américaine, dite anglaise.* Elle consiste à écraser complétement le blé dans un seul passage entre les meules, qui doivent être très-rapprochées, afin de produire le moins possible de gruau. Le son et les différentes qualités de farines sont séparés au moyen de bluteries convenables. Les meules ont $1^m$,30 de diamètre, et elles font 120 tours à la minute.

Les blés qui conviennent le mieux à ce genre de mouture sont les durs et demi-durs.

Pour 100 kilogrammes de blé, on obtient en moyenne :

| | |
|---|---|
| Farine à pain blanc | 60 |
| *Id.* demi-blanc | 14 |
| Sons gros et menus | 24 |
| Déchet | 2 |
| Total | 100 |

3° *Mouture à gruaux.* Elle produit les belles farines employées à faire les pains de luxe dans les grandes villes; on ne l'applique avec avantage qu'à des froments demi-durs et durs, à grains réguliers et volumineux.

Après avoir soumis le blé à un nettoyage énergique, on le fait passer entre des meules convenablement éloignées pour bien détacher l'écorce du gruau, en produisant le moins possible de folle farine. La mouture est alors amenée dans un blutoir en étamine, qui sépare la farine dite *petit-blanc* ou à *vermicelle;* puis le mélange de son et de gruaux est versé dans une bluterie d'étoffe à mailles de plus en plus larges, qui partage les gruaux en trois grosseurs; les moins gros, dits *fins-finots*, fournissent la première qualité de farine. Quant aux moyens et aux gros, ils sont traités séparément et débarrassés du son et de la folle farine qui peut encore y adhérer; ainsi purifiés, ces deux gruaux, que l'on nomme semoule, sont de nouveau soumis à la mouture, ce qui donne une farine que l'on réunit à la précédente pour former le n° 1, et de nouveaux gruaux. La farine obtenue des 3e et 4e gruaux forme le n° 2; celle qui provient de la 5e mouture est dite blanche. La 6e mouture fournit de la farine que l'on mêle avec la farine d'écorçage. La 7e mouture donne la farine bise.

Résultats moyens obtenus pour 100 kilog. de blé de bonne qualité :

| | |
|---|---|
| Criblure ou petit blé | $0^k$,800 |
| Farine dite à vermicelle | 20 ,352 |
| *Id.* des gruaux n° 1 | 20 ,352 |
| *Id.* *id.* n° 2 | 6 ,360 |
| *Id.* dite blanche | 11 ,448 |
| *Id.* *id.* bise | 19 ,040 |
| Son | 6 ,000 |
| Recoupe | 6 ,400 |
| Remoulage | 7 ,599 |
| Perte | 1 ,649 |
| Total | 100 ,000 |

## ÉCOULEMENT DES GAZ.

**212.** *Écoulement des gaz.* (Consulter, pour l'analogie, l'écoulement de l'eau, n^os^ 131 et suivants). L'expérience prouve que les volumes d'un même poids d'un même gaz, sous des pressions différentes et à des températures différentes, sont entre eux dans le rapport inverse des pressions, et dans le rapport direct des volumes que prend l'unité de volume à 0° en passant aux températures du gaz. De là il résulte que les poids d'un même volume ou les densités d'un même gaz, sous des pressions différentes et à des températures différentes, sont entre eux dans le rapport direct des pressions et dans le rapport inverse des volumes de l'unité de volume à 0°, ramenés aux températures du gaz; ainsi, le poids d'un mètre cube d'air à 0° et sous la pression 0^m^,76 étant 1^k^,293, à la température de $t°$ et sous la pression $h$ il est

$$1^k,293 \frac{h}{0,76} \frac{1}{1+0,003\,665t} = 1,702 \frac{h}{1+0,003\,665t}.$$

0,003 665 coefficient de dilatation de l'air (2^e^ partie);
$1+0,003\,665t$ volume que prend l'unité de volume à 0°, en passant à la température $t°$.

L'air de l'atmosphère contient toujours de la vapeur d'eau, et d'autant plus que sa température est plus élevée; comme cette vapeur diminue sa densité, dans les applications, on peut prendre pour le poids d'un mètre cube d'air atmosphérique

$$1.7 \frac{h}{1+0,0004t}.$$

Lorsqu'un gaz s'échappe d'un vase où il est comprimé, il s'écoule avec une vitesse

$$v = \sqrt{2gh'} = \sqrt{2gh\frac{\delta}{\delta'}}.$$

$v$ vitesse d'écoulement;
$h'$ hauteur génératrice de la vitesse $v$, exprimée en gaz qui s'écoule;
$h$ pression marquée par le manomètre;

$h' = h\frac{\delta}{\delta'}$;

$\delta$ densité du liquide placé dans le manomètre;
$\delta'$ densité du gaz comprimé.

La dépense théorique, c'est-à-dire le volume de gaz qui s'écoulerait par un orifice s'il n'y avait pas contraction de la veine, est

$$q = sv = s\sqrt{2gh\frac{\delta}{\delta'}}.$$

$q$ dépense théorique;
$s$ section de l'orifice d'écoulement;

La dépense effective est toujours moindre que la dépense théorique; ainsi, on a

$$Q' = kq = ks\sqrt{2gh\frac{\delta}{\delta'}}.$$

$Q'$ dépense effective en air comprimé;

$k$ coefficient de la dépense; sa valeur dépend de la forme de l'orifice d'écoulement. D'après les expériences de M. d'Aubuisson, sur des orifices en mince paroi de $0^m,01$ à $0^m,03$ de diamètre, $k = 0,63$ pour les plus petits orifices, $k = 0,673$ pour les plus grands, et $k = 0,65$ en moyenne pour les orifices compris entre ces limites. Pour les mêmes orifices garnis d'ajutages cylindriques de diamètres égaux aux leurs, et d'une longueur de 4 centimètres pour ceux de $0^m,01$, et de $0^m,08$ pour ceux de $0^m,03$, $k$ a été à peu près constant, et égal en moyenne à 0,926.

M. d'Aubuisson a voulu se rendre compte de l'influence de la longueur de l'ajutage sur la valeur de $k$, et, en opérant sur des tubes de $0^m,015$ de diamètre, il a obtenu les résultats suivants :

| LONGUEUR de l'ajutage. | VALEUR DE $k$. | DÉPENSE EFFECTIVE par seconde. |
|---|---|---|
| m. | | m. cub. |
| 0.022 | 0.938 | 0.00728 |
| 0.045 | 0.924 | 0.00700 |
| 0.162 | 0.838 | 0.00628 |
| 0.325 | 0.738 | 0.00570 |

Pour des ajutages coniques dont le diamètre à la sortie était moitié de celui de l'entrée, et compris dans les limites de $0^m,01$ à $0^m,03$, les longueurs de ces ajutages étant de $0^m,04$ pour ceux de $0^m,01$ de diamètre à la sortie, et de $0^m,08$ pour ceux de $0^m,03$, la valeur de $k$ a été à peu près constante et égale en moyenne à 0,93.

Pour les ajutages courts, peu convergents et de $0^m,015$ de diamètre à la sortie, M. d'Aubuisson a obtenu pour $k$ les valeurs du tableau suivant :

| ANGLE de convergence. | LONGUEUR de l'ajutage. | VALEUR MOYENNE de $k$. |
|---|---|---|
| | m. | |
| 6° 26′ | 0.045 | 0.938 |
| 18 54 | *id.* | 0.947 |
| 53 8 | *id.* | 0.798 |
| 11 24 | 0.025 | 0.947 |
| 28 4 | 0.040 | 0.880 |

Ce tableau fait voir que des ajutages courts et peu convergents sont

favorables à la dépense, et que l'angle de convergence ne dépassant pas 10 à 12°, il convient de faire $k = 0{,}94$.

Pour les buses, on devrait faire $k = 0{,}94$, valeur qui convient à leur angle de convergence ; mais, à cause de leur longueur et afin de n'être pas en défaut pour la dépense, on devra faire $k = 0{,}93$ dans le calcul de leur section.

Q étant la dépense effective en air comprimé, cette dépense ramenée à la pression atmosphérique sera

$$Q = Q' \frac{H + h}{H}.$$

Q volume d'air écoulé, ramené à la pression atmosphérique;
H pression atmosphérique;
$h$ pression manométrique;

Les pressions H et $h$ sont exprimées en hauteurs de même liquide, c'est ordinairement en mercure.

## CONDUITES D'AIR.

**213.** *Conduites d'air.* (N^os^ 165 et suivants.) De même que l'eau, l'air exerce un frottement contre les parois des tuyaux dans lesquels il circule. Ce frottement diminue la force élastique depuis l'origine du tuyau jusqu'à la fin, et cette diminution, c'est-à-dire la perte de hauteur manométrique, a la même expression que pour l'eau ; ainsi, en négligeant le terme contenant la première puissance de la vitesse de l'air dans le tuyau, ce que l'on peut faire, d'après les expériences de Hutton, pour des vitesses comprises entre 3 et 100 mètres, on peut poser

$$H - h = n' \frac{Lv^2}{D}.$$

Formule que M. d'Aubuisson transforme en cette autre :

$$H - h = n \frac{hLd^4}{D^5}. \qquad (1)$$

$n'$ coefficient;
$v$ vitesse moyenne de l'air dans le tuyau; elle n'est jamais supérieure à 50 mètres et rarement inférieure à 3 mètres;
H hauteur indiquée par le manomètre placé à l'origine de la conduite;
$h$ hauteur indiquée par le manomètre placé à l'extrémité de la conduite;
$n$ coefficient qui est égal, d'après les expériences de M. d'Aubuisson sur des tuyaux en fer-blanc de 0^m^.0235 à 0^m^ 10 de diamètre, à 0.0238 en moyenne; cette valeur suppose que la buse ou l'ajutage placé à l'extrémité de la conduite donne lieu à un coefficient de dépense égal à 0.93, comme cela a lieu généralement (212);
L longueur de la conduite;
$d$ diamètre de la buse ou de l'ajutage par lequel l'air s'écoule;
D diamètre de la conduite.

De la formule précédente on tire

$$H = h\left(1 + \frac{nLd^4}{D^5}\right).$$

H pression que doit indiquer le manomètre placé à l'origine de la conduite pour que l'air s'échappe par la buse avec une vitesse due à la hauteur $h$ exprimée en air comprimé, c'est-à-dire à la hauteur $h' = h\frac{\delta}{\delta'}$ (212). Cette vitesse n'est pas inférieure à 80 mètres par seconde pour les hauts fourneaux marchant au charbon de bois, et à 150 mètres pour ceux marchant au coke.

M. d'Aubuisson a aussi donné l'expression de la dépense d'une conduite ; elle est

$$Q = 1870\sqrt{\frac{1 + 0.004t}{b + h}}\sqrt{\frac{HD^5}{L + 42\frac{D^5}{d^4}}}.$$

Q volume d'air à $t°$ et sous la pression $b + h$, écoulé par seconde ;
$b$ pression atmosphérique ;
0,004 coefficient de dilatation du gaz (212).

Si la conduite est entièrement ouverte à l'extrémité, on a $d = D$, et en faisant égal à 1 le coefficient de la dépense 0,93 dans le facteur 1870, la formule précédente devient

$$Q = 2011\sqrt{\frac{1 + 0.004t}{b + h}}\sqrt{\frac{HD^5}{L + 42D}}.$$

Des expériences faites par M. Girard sur une conduite de $0^m,01579$ de diamètre, formée de canons de fusil adaptés bout à bout, ont donné

$$Q = 1989\sqrt{\frac{1 + 0.004t}{b + h}}\sqrt{\frac{HD^5}{L + 42D}}.$$

Comme, dans ces cas d'écoulement à l'air libre, on peut supposer $h = 0$, et par suite $b + h = 0^m,76$, on a, en faisant $t = 12°$, température moyenne de la France,

$$Q = 2336\sqrt{\frac{HD^5}{L + 42D}}.$$

Pour l'eau, M. d'Aubuisson donne pour l'expression de la dépense Q', dans les grandes vitesses,

$$Q' = 76,45\sqrt{\frac{HD^5}{L + 36D}}.$$

On a donc à peu près

$$Q' : Q = 76,45 : 2336 = 1 : 30,55.$$

C'est-à-dire que, sous une même charge, une même conduite dépense, en volume, 30.55 fois plus d'air que d'eau.

Pour un autre gaz quelconque, les dépenses Q seront obtenues en divisant les valeurs précédentes données pour l'air par $\sqrt{\delta''}$, $\delta''$ étant la densité du gaz qui s'écoule par rapport à celle de l'air; ainsi pour le gaz de l'éclairage ce sera par $\sqrt{0,559}$.

La résistance des coudes est sensiblement proportionnelle au carré de la vitesse du fluide et au carré du sinus de l'angle du coude; mais M. d'Aubuisson, dans ses expériences, a reconnu qu'au delà d'un certain nombre de coudes, la résistance ne croissait plus proportionnellement à leur nombre, et qu'elle diminuait quand ce nombre augmentait; ainsi quinze coudes ont donné moins de résistance que sept de même grandeur. Sept coudes à 45° ont diminué la dépense de 1/4. Dans la pratique, on évitera le mauvais effet des coudes en arrondissant bien ceux qu'on ne pourra éviter.

## MACHINES SOUFFLANTES.

**214.** *Machines soufflantes.* Pour les machines soufflantes à cylindre en fonte, le rapport du volume d'air expulsé au volume engendré par le piston est égal à 0,75, et pour les machines à caisse carrée en bois, ce rapport est égal à 0,55 seulement.

Désignant par Q le volume effectif d'air, à 0° et sous la pression $0^m,76$, que doit fournir la machine en une minute, on calcule le diamètre et la course du piston pour fournir un volume

$$Q(1 + at).$$

$a$ coefficient de dilatation de l'air, qu'on suppose égal à 0.004 (212);
$t$ température de l'air; en France on fait $t = 20°$.

Le volume engendré par un piston cylindrique et par un piston carré est respectivement en une minute (*Int.*, 842, 859)

$$\frac{1}{4}\pi D^2 ln, \quad \text{et} \quad C^2 ln.$$

D diamètre du piston cylindrique;
$l$ course du piston;
$n$ nombre de coups de piston par minute;
C côté du piston carré.

On aura donc pour les deux genres de machines

$$Q(1 + 0.004t) = 0.75\,\frac{1}{4}\pi D^2 ln, \quad \text{et} \quad Q(1 + 0.004t) = 0.55 C^2 ln.$$

Faisant $t = 20°$, on conclut

$$D^2 = 1.834\,\frac{Q}{ln}, \quad \text{et} \quad C^2 = 1.964\,\frac{Q}{ln}.$$

Pour les machines à cylindre, la vitesse du piston varie de 0m,50 à 1 mètre par seconde, et on fait ordinairement $l = D$.

Désignant par $v$ la vitesse du piston, on a $nl = 60v$, et par suite,

$$D^2 = 1.834 \frac{Q}{60v} = 0,031 \frac{Q}{v}.$$

Pour les machines à cylindre, la section des soupapes d'aspiration varie de 1/15 et 1/12 de la section du cylindre soufflant pour des vitesses de piston comprises entre 0m,50 et 0m,75, et de 1/10 à 1/9 pour des vitesses comprises entre 0m,75 et 1 mètre. Il ne convient pas que la vitesse dépasse 0m,60.

Pour les machines à caisse carrée, la vitesse du piston varie de 0m,25 à 0m,30 par seconde, et la section des soupapes d'aspiration est comprise entre le 1/15 et le 1/20 de celle de la caisse.

Pour les machines à cylindre, comme pour celles à caisse, la section des soupapes d'expiration varie de 1/15 à 1/20 ou 1/22 de celle du cylindre ou de la caisse.

Les tuyaux de conduite ont une section à peu près égale à celle des soupapes d'expiration. Dans la pratique, la vitesse de l'air y est ordinairement réglée à 20 mètres par seconde.

Les pistons des caisses en bois sont mis en mouvement par des cames, et leur course n'excède pas 0m,65.

Le diamètre de la tige du piston varie de 1/20 à 1/17 de celui du cylindre.

La pression de l'air dans le cylindre doit être suffisante pour soulever la soupape, vaincre le frottement dans le tuyau qui conduit l'air du cylindre au régulateur, celui qui peut avoir lieu dans le régulateur, ainsi que celui qui a lieu dans le tuyau qui amène l'air du régulateur à la buse, et produire une vitesse d'écoulement convenable par la buse. D'après ce qui a été dit n° 213, on pourra calculer les différentes pertes de force élastique dues au frottement de l'air dans les tuyaux, et comme on peut, avec approximation, tenir compte de l'effet de la soupape, on aura donc la pression absolue de l'air dans le cylindre.

Dans une machine soufflante, l'équilibre dynamique est, pour une minute,

$$T_m = T_u + T_r.$$

$T_m$ travail moteur dépensé par minute sur la tige du piston soufflant ;

$T_u$ travail absorbé pour comprimer l'air à la pression P dans le cylindre, et le faire sortir de ce cylindre ;

$T_r$ travail absorbé par le frottement de la garniture du piston et celui de la tige dans le stuffing-box, et pour soulever les soupapes.

Pour une cylindrée, on a

$$t_u = qp \times 2,3026 \log \frac{P}{p}.$$

$q$ volume d'une cylindrée ;

$p$ pression atmosphérique ; c'est sensiblement la pression de l'air derrière le piston.

$\frac{1}{0.4342945} = 2.3026$ nombre par lequel il faut multiplier le logarithme vulgaire d'un nombre pour avoir son logarithme népérien (*Int.* 385).

Tant que $\frac{P}{p}$ est plus petit que 2, on peut supposer

$$2.3026 \log \frac{P}{p} = \frac{P-p}{0.50(P+p)},$$

et il vient

$$t_u = qp \frac{P-p}{0.50(P+p)}.$$

Pour un mètre carré de surface,

$$p = 0{,}76 \times 13596^k, \quad \text{et} \quad P = (0.76+h)13596 \text{ kilog.}$$

$h$ hauteur marquée par le manomètre à mercure placé sur le cylindre (44).

Substituant ces valeurs de $p$ et P dans celle de $t_u$, on a

$$t_u = q \times 13596 \frac{1.52h}{1.52+h}.$$

Q′ étant le volume engendré par le piston en une minute, on a

$$Q(1+0.004t) = 0.75Q',$$

d'où l'on tire

$$Q' = \frac{Q}{0.75}(1+0.004t).$$

On a

$$nq = Q',$$

et par suite,

$$nt_u = \mathcal{T}_u = Q' \times 13596 \frac{1.52h}{1.52+h} = \frac{Q}{0.75}(1+0.004t)13596 \frac{1.52h}{1.52+h}.$$

Le frottement de la garniture du piston dépendant de la pression, il faudrait tenir compte des variations de pression de l'air dans le cylindre ; mais il convient de supposer la pression constante et égale à $h$, ce qui permet de négliger le frottement de la tige dans le stuffing-box, et on a alors (65)

$$\mathcal{T}_r = n\pi Dehfl,$$

d'où

$$\mathcal{T}_m = \frac{Q}{0.75}(1+0.004t)13596 \frac{1.52h}{1.52+h} + n\pi Dehfl.$$

Il convient de prendre $e = 0^m.04$ et de faire $f = 0.30$.

Le travail absorbé par le stuffing-box a la même expression que $T_r$; mais $e$ se prend alors égal au diamètre de la tige, et on a $f = 0.20$ environ.

D'après MM. Thomas et Laurens, l'air que la tuyère doit projeter dans le haut fourneau est celui nécessaire à la conversion en oxyde de carbone, du charbon *solide* chargé au gueulard, c'est-à-dire du charbon déduction faite des cendres, de l'eau et des matières volatiles.

Un kilogramme de charbon solide exigeant $4^{mc},41$ d'air à 0° sous la pression $0^m,76$ pour sa conversion en oxyde, comme le charbon de bois moyen contient 0,07 d'eau, 0,025 de cendres et 0,14 de matières volatiles, chaque kilogramme de charbon chargé au gueulard exigera $4,41 \times 0,765 = 3^{mc},374$ d'air.

Un coke moyen contenant 0,05 d'eau, 0,03 de matières volatiles et 0,12 de cendres, les tuyères devront envoyer $4,41 \times 0,80 = 3^{mc},528$ d'air à 0° et à la pression $0^m,76$ par chaque kilogramme de coke chargé au gueulard.

De ces nombres, il résulte que, pour une marche régulière, la tuyère doit envoyer par minute $11^{mc},241$ d'air, à 0° et à la pression $0^m,76$, dans un haut fourneau produisant 4000 kilog. de fonte par jour avec une consommation de 1200 kilog. de charbon de bois par tonne. Ce volume d'air est de $68^{mc},600$ pour un haut fourneau produisant 20 tonnes de fonte par jour avec une consommation de 1400 kilog. de coke par tonne.

Si l'on avait à craindre des pertes par suite d'un refoulement de l'air à la tuyère, on y obvierait en portant la consommation de $4^m,41$ à $4^m,60$.

La capacité utile d'un régulateur à eau varie de dix à douze fois celle du cylindre soufflant; sa section horizontale se fait égale à celle de l'eau environnante. L'eau doit toujours s'élever à $0^m,30$ au-dessus de l'arête inférieure du régulateur, afin qu'on soit assuré qu'il ne s'échappera pas d'air. La capacité d'un régulateur à cylindre flottant varie de deux à trois fois celle du cylindre soufflant; celle d'un régulateur à capacité constante varie de vingt à vingt-cinq fois celle de ce cylindre.

### VENTILATEURS.

**215.** 1° *Ventilateur aspirant.* Si les orifices de sortie de ce ventilateur étaient égaux aux orifices d'entrée, et si l'air n'éprouvait aucune résistance pour pénétrer entre les ailes, ni contre ces ailes, la vitesse de sortie de l'air serait égale à la vitesse de rotation de l'extrémité des ailes. A cause des phénomènes compliqués qui ont lieu dans le ventilateur, il a été impossible jusqu'à présent de donner une expression analytique satisfaisante de son effet. La théorie a conduit M. Combes à courber les ailes; mais jusqu'à présent on a donné la préférence aux ventilateurs à ailes planes, qui sont d'une construction plus facile.

Il convient de faire le diamètre extérieur du ventilateur double du

diamètre intérieur. La distance des joues doit être égale au rayon intérieur si l'air arrive par les deux joues, et moitié seulement si l'air n'arrive que par un côté. Le nombre convenable d'ailes est six. (Consulter la deuxième partie.)

2° *Ventilateur soufflant.* Les phénomènes qui se passent dans ce ventilateur sont encore plus compliqués que dans le précédent. Nous nous contenterons de donner ici les résultats fournis par deux ventilateurs soufflants, à ailes planes légèrement inclinées sur le rayon ; le premier à MM. Sudds, Barker et compagnie, de Rouen ; le deuxième à M. Martin, aussi de Rouen.

| NOMBRE d'ailes. | DIAMÈTRE extérieur. | DIAMÈTRE intérieur. | ÉCARTEMENT des joues. | CUBILOTS desservis. | NOMBRE de tours en 1'. | FORCE en chevaux vapeur. | PRODUIT total en fonte, par heure. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | m. | m. | m. | | | | kilog. |
| 6 | 1.0 | 0.50 | 0.20 | 2 | 1000 | 4 | 4000 |
| » | 1.4 | 0.40 | 0.35 | 2 | 600 | 4 | » |

Il convient de faire aspirer les ventilateurs par les deux joues, et de tenir leur diamètre entre les limites $0^m,90$ et $1^m,10$.

## RÉSISTANCE DES MATÉRIAUX.

**216.** *Résistance à la traction.* Lorsqu'un corps solide est tiré dans le sens de sa longueur, il s'allonge d'une certaine quantité, variable pour chaque nature de corps, mais proportionnelle, pour une même matière, à la longueur de la pièce et à l'effort de traction, et inversement proportionnelle à la section transversale de cette pièce.

Cette loi n'est vraie qu'autant que la charge ne produit pas un allongement supérieur à celui que peut atteindre la pièce sans cesser de reprendre sa longueur primitive quand l'effort cesse son action. Ce plus grand allongement correspond à ce qu'on appelle la limite d'élasticité, limite qu'il ne faut jamais dépasser ni même atteindre dans la pratique.

L'allongement que prend un corps soumis à la traction est alors donné par la formule

$$i = \frac{P}{EA}, \quad \text{d'où} \quad E = \frac{P}{Ai}, \quad \text{et} \quad P = iEA.$$

$i$ allongement du corps par mètre de longueur de la pièce, dans la limite d'élasticité, en mètres;
P effort qui tend à allonger le corps, en kilogrammes;
A section transversale du corps, en millimètres carrés;

E quantité constante pour une même nature de corps, et qu'on nomme *coefficient* ou *module d'élasticité ;* c'est le poids, exprimé en kilogrammes, qui serait capable, si cela était possible, d'allonger un corps prismatique, de matière homogène et d'un millimètre carré de section, d'une quantité égale à sa longueur primitive, en supposant que l'allongement ne cesse pas d'être proportionnel à la charge. Pour le mètre carré de section, la valeur de E est un million de fois plus grande.

Ce qui précède peut se répéter pour la compression.

M. Poncelet a formé le tableau suivant, qui donne, pour différents corps, les valeurs moyennes de E, ainsi que celles de $i$ et de P correspondant à la limite d'élasticité de ces corps.

| DÉSIGNATION DES CORPS. | VALEUR de $i$. | VALEUR DE P pour 1 millim. carré de section. | VALEUR DE E pour 1 millim. carré de section. |
|---|---|---|---|
| | m. | kil. | kil. |
| Chêne | $\frac{1}{600} = 0.00167$ | 2.00 | 1200 |
| Sapin jaune ou blanc | $\frac{1}{850} = 0.00117$ | 2.17 | 1854 |
| Sapin rouge ou pin | $\frac{1}{470} = 0.00210$ | 3.15 | 1500 |
| Mélèze ou larix | $\frac{1}{520} = 0.00192$ | 1.73 | 900 |
| Hêtre rouge | $\frac{1}{570} = 0.00175$ | 1.63 | 930 |
| Frêne | $\frac{1}{885} = 0.00113$ | 1.27 | 1120 |
| Orme | $\frac{1}{414} = 0.00242$ | 2.35 | 970 |
| Fers doux passés à la filière, de petites dimensions | $\frac{1}{1250} = 0.00080$ | 14.75 | 18000 |
| Fers en barres | $\frac{1}{1520} = 0.00066$ | 12.205 | 20000 |
| Fers du Berry étirés* | » | » | 20869 |
| Fers du Berry recuits* | » | » | 20784 |
| Acier d'Allemagne, très-bonne qualité, recuit à l'huile | $\frac{1}{835} = 0.00120$ | 25.00 | 21000 |
| Acier fondu très-fin, trempé, recuit à l'huile | $\frac{1}{4500} = 0.000222$ | 66.00 | 30000 |
| Acier fondu étiré* | » | » | 19549 |
| Acier fondu recuit* | » | » | 19561 |
| Acier anglais en fil étiré* | » | » | 18809 |
| Acier anglais en fil recuit* | » | » | 17278 |
| Acier ordinaire recuit au blanc* | » | » | 18045 |
| Fonte de fer à grains fins | $\frac{1}{1200} = 0.00083$ | 10.00 | 12000 |
| Fonte grise ordinaire, anglaise, bonne qualité | $\frac{1}{1400} = 0.00078$ | 6.00 | 9096 |
| Fils de cuivre étirés | » | » | 12000 |
| Fils de cuivre recuits* | » | » | 10500 |

* Expériences de M. Wertheim.

| DÉSIGNATION DES CORPS. | VALEUR de $i$. | VALEUR DE P pour 1 millim. carré de section. | VALEUR DE E pour 1 millim. carré de section. |
|---|---|---|---|
| | m. | kil. | kil. |
| Fils de laiton recuits. . . . . | $\frac{1}{742} = 0.00135$ | 15.00 | 10 000 |
| Laiton fondu. . . . . | $\frac{1}{1320} = 0.00076$ | 4.80 | 6 450 |
| Bronze de canon fondu. . . . . | $\frac{1}{1590} = 0.00063$ | 2.00 | 3 200 |
| Fil de plomb de coupelle, étiré à froid, de 4 mill. de diamètre. | $\frac{1}{1490} = 0.00067$ | 0.40 | 600 |
| Fil de plomb impur, du commerce, étiré à froid, de 6 millimètres de diamètre. . . . | $\frac{1}{2000} = 0.00050$ | 0.40 | 800 |
| Plomb fondu ordinaire. . . . . | $\frac{1}{477} = 0.00240$ | 1.00 | 500 |
| Étain *. . . . . | » | » | 3 200 |
| Zinc *. . . . . | » | » | 9 600 |
| Or étiré *. . . . . | » | » | 8 131 |
| Or recuit *. . . . . | » | » | 5 585 |
| Argent étiré *. . . . . | » | » | 7 358 |
| Argent recuit *. . . . . | » | » | 7 140 |
| Platine, fil moyen *. . . . . | » | » | 17 044 |
| Platine, fil moyen, recuit *. . . | » | » | 15 548 |

A l'aide de ce tableau et de la loi posée au commencement de ce numéro, on déterminera facilement l'allongement d'un corps du tableau, de section et longueur données, soumis à une charge aussi donnée.

Ainsi, sous une traction de 3000 kilog., une barre de fer de 500 millimètres carrés de section et de 8 mètres de longueur s'allongera de

$$0,00066 \times 8 \times \frac{3000}{12,205} \times \frac{1}{500} = 0^{m},0026.$$

Dans la pratique, il convient de ne soumettre les pièces qu'on ne peut éprouver directement avant leur emploi qu'à des charges permanentes qui ne dépassent pas la moitié de celles correspondant à la limite d'élasticité; on ne devra dépasser cette moitié que pour les cas de constructions non permanentes et non soumises à des efforts longtemps prolongés, et il ne convient, dans aucun cas, que les charges dépassent les 3/4 de celles correspondant à cette limite. Il convient, toutes les fois que cela est possible, de faire usage de cette règle pour déterminer les dimensions des pièces de construction.

Quant au cas où l'on se trouve parfaitement éclairé sur les qualités et la nature de la matière, lorsque surtout on est certain de sa parfaite homogénéité, on peut augmenter les charges jusqu'à celles qui sont voisines de la limite d'élasticité; c'est ce que font les compagnies qui se livrent spécialement à la construction des ponts suspendus.

*TABLEAU des résultats des expériences de MM. Chevandier et Wertheim, sur les bois des Vosges.*

| DÉSIGNATION DES BOIS. | VALEUR DE *i*. | VALEUR de P pour 1 millimètre carré de section. | VALEUR de E pour 1 millimètre carré de section. |
|---|---|---|---|
| | m. | k. | k. |
| Acacia. | 0.002 53 | 3.188 | 1 261.9 |
| Sapin. | 0.001 93 | 2.453 | 1 113.2 |
| Charme. | 0.001 48 | 1.282 | 1 085.7 |
| Bouleau. | 0.001 62 | 1.617 | 997.2 |
| Hêtre. | 0.002 36 | 2.317 | 980.4 |
| Chêne à glands pédonculés. | » | » | 977.8 |
| Chêne à glands sessiles. | 0.002 54 | 2.349 | 921.8 |
| Pin sylvestre. | 0.002 89 | 1.633 | 564.1 |
| Orme. | 0.001 58 | 1.842 | 1 165.3 |
| Sycomore. | 0.000 98 | 1.139 | 1 163.8 |
| Frêne. | 0.001 11 | 1.246 | 1 121.4 |
| Aune. | 0.001 01 | 1.121 | 1 108.1 |
| Tremble. | 0.000 96 | 1.035 | 1 075.9 |
| Érable. | 0.001 05 | 1.068 | 1 021.4 |
| Peuplier. | 0.001 95 | 1.007 | 517.2 |

VALEURS du coefficient d'élasticité et de la charge de rupture par millimètre carré dans les deux sens perpendiculaires aux fibres (bois des Vosges).

| DÉSIGNATION DES BOIS. | VALEUR E. | | CHARGE DE RUPTURE. | |
|---|---|---|---|---|
| | Dans le sens du rayon. | Dans le sens perpendiculaire au rayon du cylindre. | Dans le sens du rayon. | Dans le sens perpendiculaire au rayon du cylindre. |
| | k. | k. | k. | k. |
| Charme. | 208.4 | 103.4 | 1.007 | 0.608 |
| Tremble. | 107.6 | 43.7 | 0.171 | 0.414 |
| Aune. | 98.3 | 59.4 | 0.329 | 0.175 |
| Sycomore. | 134.9 | 80.5 | 0.522 | 0.610 |
| Érable. | 137.1 | 72.7 | 0.716 | 0.371 |
| Chêne. | 188.7 | 129.8 | 0.582 | 0.406 |
| Bouleau. | 81.1 | 155.2 | 0.823 | 1.063 |
| Hêtre. | 269.7 | 159.3 | 0.885 | 0.752 |
| Frêne. | 111.3 | 102.0 | 0.218 | 0.408 |
| Orme. | 122.6 | 63.4 | 0.345 | 0.366 |
| Peuplier. | 73.3. | 38.9 | 0.146 | 0.214 |
| Acacia. | 170.3 | 152.2 | » | 1.321 |
| Sapin. | 94.5 | 34.1 | 0.220 | 0.297 |
| pin sylvestre. | 97.7 | 28.6 | 0.256 | 0.496 |

*Effort de rupture par traction.* L'effort qui peut produire la rupture d'une pièce, en agissant dans le sens de sa longueur, est

$$P = Af.$$

A section transversale de la pièce;

$f$ effort nécessaire pour rompre une tige de même matière que la pièce et dont la section est l'unité prise pour exprimer A.

*TABLEAU des valeurs de f pour différents corps.*

| DÉSIGNATION DES CORPS. | VALEUR de $f$ pour 1 millimètre carré de section. | EFFORT d'une grande sécurité en pratique pour 1 m.m.c. |
|---|---|---|
| | kil. | kil. |
| 1° BOIS (*a*). | | |
| Chêne, dans le sens des fibres, fort. | 8.00 | 0.800 |
| Chêne, dans le sens des fibres, faible. | 6.00 | 0.600 |
| Tremble, *id.* | 6.00 à 7.00 | 0.60 à 0.70 |
| Sapin, *id.* | 8.00 à 9.00 | 0.80 à 0.90 |
| Sapin des Vosges, *id.* | 4.00 | 0.400 |
| Pin silvestre des Vosges, *id.* | 2,48 | 0.248 |
| Frêne, *id.* | 12.00 | 1.200 |
| Frêne des Vosges, *id.* | 6.78 | 0.678 |
| Orme, *id.* | 10.40 | 1.040 |
| Orme des Vosges, *id.* | 6.99 | 0.699 |
| Hêtre, *id.* | 8.00 | 0.800 |
| Teak, *id.* employé aux constructions navales. | 11.00 | 1.100 |
| Buis, *id.* | 14.00 | 1.400 |
| Poirier, *id.* | 6.90 | 0.690 |
| Acajou, *id.* | 5.60 | 0.560 |
| Tremble des Vosges, *id.* | 7.20 | 0.720 |
| Tremble, latéralement aux fibres (ou par glissement). | 0 57 | 0.057 |
| Sapin, *id.* *id.* | 0.42 | 0.042 |
| Chêne, perpendiculairement aux fibres. | 1.60 | 0.160 |
| Peuplier, *id.* | 1.25 | 0.125 |
| Larix, *id.* | 0.94 | 0.094 |
| Chêne ou sapin. Pièces droites formées de morceaux assemblés par entailles en crémaillères. | 4.00 | 0.400 |
| Chêne ou sapin. Arcs en planches de champ ou en bois plié. | 3.00 | 0.300 |
| 2° MÉTAUX (*b*). | | |
| Fer forgé ou étiré en barres. Le plus fort, de petit échantillon. | 60.00 | 10.00 |
| Fer forgé ou étiré en barres. Le plus faible, de très-gros échantillon. | 25.00 | 4.16 |
| Fer forgé ou étiré en barres. Moyen. | 40.00 | 6.66 |

(*a*) Dans la pratique, les pièces de bois ne peuvent être soumises à une traction permanente supérieure au 1/10 de celle de rupture; cette faible charge est due aux altérations auxquelles les bois sont sujets : ainsi l'expérience a appris que le bois de chêne, qui résiste cependant bien aux intempéries des saisons, ne peut être exposé plus de 25 à 30 ans à l'air libre, à la manière des pièces de ponts, sans être renouvelé.

(*b*) Dans la pratique, il convient que la charge permanente des fers ne dépasse dans aucun cas le 1/3 de la charge de rupture, et qu'elle n'en soit que le 1/4 ou le 1/5 et même le 1/6 quand les constructions sont de grande durée, et que l'on n'est pas suffisamment éclairé sur la qualité et l'homogénéité des fers. Pour la fonte, la charge

| DÉSIGNATION DES MATIÈRES. | | VALEUR de $f$ pour 1 millimètre carré de section. | EFFORT d'une grande sécurité en pratique pour 1 m.m.c. |
|---|---|---|---|
| | | kil. | kil. |
| Fer ou tôle laminée. . . . | Tiré dans le sens du laminage (Navier). | 41.00 | 7.00 |
| | Tiré dans le sens perpendiculaire (*id.*). | 36.00 | 6.00 |
| Tôles fortes corroyées dans les deux sens. . . . . | | 35.00 | 6.00 |
| Fer dit *ruban*, très-doux. . . . . | | 45.00 | 7.50 |
| Fil de fer non recuit. . . . | De Laigle, employé à la carderie, de 0.23 de millimètre de diamètre. . . | 90.00 | 15.50 |
| | Le plus fort, de 0.5 à 1.0 millim. de diamètre. . . . . | 80.00 | 13.33 |
| | Le plus faible, d'un grand diamètre. . | 50.00 | 8 33 |
| | Moyen, de 1 à 3 millim. de diamètre. | 60.00 | 10.00 |
| Fil de fer en faisceau ou câble (M. Bornet). . . . . | | 30.00 | 5.00 |
| Chaînes en fer doux. . . . . | Ordinaires à maillons oblongs. . . . . | 24.00 | 4.00 |
| | Renforcées par des étançons. . . . . | 32.00 | 5.33 |
| Fonte de fer grise. | La plus forte, coulée verticalement. . | 13.50 | 2.25 |
| | La plus faible, coulée horizontalement. | 12.50 | 2.08 |
| Acier. . . . . | Fondu ou de cémentation, étiré au marteau et en petits échantillons (1re qualité). . . . . | 100.00 | 16.67 |
| | Le plus mauvais, en barres de très-gros échantillons, mal trempé. . . | 36.00 | 6.00 |
| | Moyen. . . . . | 75.00 | 12.50 |
| Bronze de canons, moyennement. . . . . | | 23.00 | 3.83 |
| Cuivre rouge laminé, dans le sens de la longueur (Navier). . . . . | | 21.00 | 3.50 |
| Cuivre rouge de qualité supérieure (Trémery et Poirier Saint-Brice). . . . . | | 26.00 | 4.33 |
| Cuivre rouge battu (Rennie). . . . . | | 25.00 | 4.17 |
| *Id.* fondu (*id.*). . . . . | | 13.40 | 2.33 |
| Cuivre jaune ou laiton fin (*id.*). . . . . | | 12.60 | 2.10 |
| Arcs ou pièces d'assemblage en fer forgé ou en fonte grise. . . . . | | 25.20 | 4.20 |
| Cuivre rouge en fil, non recuit. | Le plus fort, de moins de 1 millimètre de diamètre. . . . . | 70.00 | 11.67 |
| | Moyen, de 1 à 2 millim. de diamètre. | 50.00 | 8.33 |
| | *Id.* le plus mauvais. . . . . | 40.00 | 6.67 |
| Cuivre jaune (laiton) en fil non recuit. . . . . | Le plus fort, de moins de 1 millimètre de diamètre (Dufour). . . . | 85.00 | 14.16 |
| | Moyen, de plus de 1 millimètre de diamètre (Ardant et Dufour). . . . . | 50.00 | 8.33 |
| Fil de platine écroui, non recuit, de 0.117 de millimètre de diamètre (Baudrimont). . . . . | | 116.00 | 19.33 |
| Fil de platine recuit, d'après la mesure directe du diamètre. | | 34.00 | 5.67 |
| Étain fondu (Rennie). . . . . | | 3.00 | 0.50 |
| Zinc fondu. . . . . | | 6.00 | 1.00 |
| Zinc laminé. . . . . | | 5.00 | 0.833 |
| Plomb fondu (Rennie). . . . . | | 1.28 | 0.213 |
| Plomb laminé (Navier). . . . . | | 1.35 | 0.225 |

permanente ne doit jamais dépasser le 1/4 de la charge de rupture, et encore doit-on éviter son emploi dans les constructions exposées à des chocs.

Le rapport des charges permanentes aux charges de rupture pour les autres métaux est le même que pour le fer ou la fonte, suivant que leur état se rapproche plus de celui de l'un ou de l'autre de ces métaux.

| DÉSIGNATION DES MATIÈRES. | VALEUR de $f$ pour 1 millimètre carré de section. | EFFORT d'une grande sécurité en pratique pour 1 m.m.c. |
|---|---|---|
| | kil. | kil. |
| Fil de plomb de coupelle, fondu, puis passé à la filière, ayant 4 millimètres de diamètre (Ardant). . . . . | 1.36 | 0.227 |
| **3° CORDES (*c*).** | | |
| Aussières et grelins en chanvre de Strasbourg, de 13 à 14 millimètres de diamètre. . . . . | 8.80 | 4.40 |
| Aussières et grelins en chanvre de Lorraine, de 13 à 17 millimètres. . . . . | 6.50 | 3.25 |
| Aussières et grelins en chanvre de Lorraine ou de Strasbourg, de 23 millimètres. . . . . | 6.00 | 3.00 |
| Aussières et grelins de Strasbourg, de 40 à 54 millim. . | 5.50 | 2.75 |
| Cordages goudronnés. . . . . | 4.40 | 2.20 |
| Vieille corde, de 23 millimètres. . . . . | 4.20 | 2.10 |
| Courroie en cuir noir.. . . . . | » | 0.20 |
| **4° MATIÈRES DIVERSES (*d*).** | | |
| Verre et cristal, en tubes ou en tiges pleines. . . . . | 2.48 | 0.248 |
| Basalte d'Auvergne. . . . . | 0.770 | 0.077 |
| Calcaire de Portland. . . . . | 0.600 | 0.060 |
| *Id.* blanc d'un grain fin et homogène. . . . . | 0.144 | 0.0144 |
| *Id.* à tissu compacte (lithographique). . . . . | 0.308 | 0.0308 |
| *Id.* à tissu arénacé (sablonneux). . . . . | 0.229 | 0.0229 |
| *Id.* à tissu oolithique (globuleux). . . . . | 0.137 | 0.0137 |
| Briques de Provence, très-bien cuites et d'un grain très-uni. | 0.195 | 0.0195 |
| *Id.* ordinaires, faibles. . . . . | 0.080 | 0.0080 |
| Plâtre. . gâché ferme. . . . . | 0.117 | 0.0117 |
| Plâtre. . *id.* moins ferme que le précédent. . . . . | 0.058 | 0.0058 |
| Plâtre. . *id.* fabriqué à la manière ordinaire. . . . . | 0.040 | 0.0040 |
| Mortier en chaux grasse et sable, âgé de 14 ans. . . . | 0.042 | 0.0042 |
| Mortier en chaux grasse, mauvais. . . . . | 0.0075 | 0.00075 |
| Mortier en chaux hydraulique ordinaire et sable. . . . | 0.0900 | 0.0090 |
| Mortier en chaux éminemment hydraulique. . . . . | 0.1500 | 0.0150 |
| Mortier de ciment de Pouilly et sable (parties égales), après un an de durcissement dans l'air ou dans l'eau. . . . . | 0.096 | 0.0096 |

(*c*) Pour les cordes, la charge permanente peut être la moitié de la charge de rupture. La rupture est précédée d'un allongement qui est le 1/6 de la longueur primitive; cet allongement est réduit à 1/10 si l'effort n'est que moitié de la charge maxima.

D'après Coulomb, la résistance d'une corde goudronnée n'est que les 2/3 ou les 3/4 de celle d'une corde blanche d'un même nombre de fils de caret, et, d'après Duhamel, la résistance d'une corde mouillée n'est que le 1/3 de celle de la même corde sèche.

(*d*) Ces matières ne sont employées qu'accidentellement pour résister à l'extension; la charge permanente qu'il convient de leur faire supporter est le 1/10 de la charge de rupture.

*Passons maintenant en revue quelques expériences faites dans ces derniers temps.*

1° Des expériences faites à Guérigny par M. Bornet sur une barre de fer à câble de $0^m,0495$ de diamètre et de $6^m,42$ de longueur, et d'autres faites par M. Ardant sur des fils de fer doux ou recuits et sur des fils durs ou non recuits ont donné les résultats du tableau suivant :

| FER A CABLES, DUCTILE. | | FIL DE FER. | | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Allongement par mètre courant. | |
| Charge par millimètre carré. | Allongement par mètre courant. | Charge par millimètre carré. | Fer doux recuit. | Fer dur non recuit. |
| kil. | millim. | kil. | millim. | millim. |
| 2 | 0.08 | 5 | 0.294 | 0.260 |
| 4 | 0.16 | 10 | 0.588 | 0.520 |
| 6 | 0.31 | 12 | 0.882 | 0.780 |
| 8 | 0.36 | 15 | 1.476 | 1.040 |
| 10 | 0.47 | 20 | 1.470 | 1.300 |
| 12 | 0.58 | 25 | 2.500 | 1.569 |
| 14 | 0.69 | 30 | 13.000 | » |
| 16 | 0.86 | 32.5 | 14.100 | 2.220 |
| 18 | 2.20 | 35.0 | 18.000 | 2.400 |
| 20 | 15.76 | 40.0 | 20.500 | » |
| 22 | 24.34 | 42.5 | Rupture. | 2.820 |
| 24 | 34.97 | 45.0 | » | 3.100 |
| 26 | 46.96 | 49.0 | » | Rupture. |
| 28 | 67.70 | 50.0 | » | » |
| 30 | 89.39 | | | |
| 32 | 132.48 | | | |
| | Rupture. | | | |

Ce tableau montre que jusqu'à une certaine limite, qu'on peut considérer comme la limite d'élasticité, l'allongement reste à peu près proportionnel à la charge, mais qu'au delà l'allongement augmente dans un rapport beaucoup plus grand que la charge. Il fait voir aussi quelle influence a le recuit sur la limite d'élasticité et la résistance à la rupture.

2° Des expériences faites avec beaucoup de soin par M. Eaton Hodgkinson, sur des barres de fer de première qualité et de $0^m,013\,13$ de diamètre, assemblées bout à bout par des manchons, de manière à former un ensemble de 15 mètres de longueur, il résulte :

1° Que sous les charges inférieures à celle qui correspond à la limite d'élasticité il y a un allongement permanent ;

2° Que, jusqu'à la charge de $14^k,997$ par millimètre carré, les allongements totaux croissent à peu près proportionnellement aux charges, et qu'il en est de même des allongements permanents, mais sans que ces derniers s'élèvent au plus à la valeur,

négligeable dans la pratique, d'un centième de millimètre par mètre, sous la charge de $14^k,997$;

3° Au delà de la charge de $14^k,997$, et surtout à partir de celle de $18^k,74$ par millimètre carré, les allongements, et surtout les allongements permanents, croissent très-rapidement et dans un rapport plus grand que les charges;

4° La valeur moyenne du module d'élasticité E a été de 19 359,458 500.

3° M. E. Hodgkinson a aussi fait des expériences sur des fontes de quatre localités anglaises. Les barres avaient 645 millimètres carrés de section et $3^m,05$ de longueur, assemblées bout à bout pour obtenir des longueurs de $15^m,25$. De ces expériences il résulte :

1° Que, jusqu'à la charge d'environ 6 kil. par millimètre carré, charge bien supérieure à celle que l'on atteint dans la pratique, les allongements totaux et les *allongements élastiques* (différences entre les allongements totaux et les allongements permanents) sont sensiblement proportionnels aux charges, mais cependant avec un peu plus d'écart que pour le fer;

2° Entre la charge de $0^k,74$ par millimètre carré de section et celle $5^k,92$ correspondant à un allongement de $0^m,000\,715$ par mètre ou de $\frac{1}{1400}$, la valeur moyenne du module d'élasticité est E = 9 096,070 000, valeur qui diffère de 1/12 environ de la plus forte et de la plus faible.

4° Des expériences faites par M. E. Hodgkinson ont fait connaître que la résistance de la fonte à la rupture est la même, que les hauts fourneaux soient soufflés à l'air chaud ou à l'air froid. Cette résistance a été en moyenne de $11^k,234$ par millimètre carré de section. En 1815, MM. Minard et Desormes avaient trouvé $11^k,325$.

5° La difficulté d'obtenir des pièces épaisses de fonte bien pleines et bien saines à l'intérieur fait que dans les presses hydrauliques puissantes la fonte travaille parfois sous des charges très-rapprochées de celle de rupture (197).

6° M. Edwin Clark rapporte que des expériences faites sur des tôles pour chaudières ont donné en moyenne une résistance à la rupture par traction de $30^k,89$ par millimètre carré de section. Les épaisseurs de tôle ont varié de $0^m,0127$ à $0^m,0175$, et, quoique de provenances diverses, les résistances n'ont pas varié sensiblement.

7° Des expériences faites pour déterminer l'influence du sens du laminage sur la résistance de la tôle ont donné en moyenne $31^k,48$ et $28^k,48$, suivant que la tôle est tirée parallèlement ou normalement au sens du laminage.

D'autres expériences faites dans le même but par M. Fairbairn, ingénieur de Manchester, ont donné $34^k,46$ et $35^k,25$ pour ces résistances moyennes; c'est sensiblement la même valeur.

8° Les rivets qui réunissent les plaques de tôle, les boulons d'assemblage des chaînes plates, ceux des poulies, des moufles, etc., résistent à un effort transversal ou de *cisaillement*.

Suivant que les boulons ou rivets réunissent 2, 3, 4... $n$ plaques,

comme dans les moufles par exemple, il y a respectivement 1, 2, 3...$n$—1 points de cisaillement, et l'expérience prouve que la résistance est proportionnelle à ces nombres de points, et que cette résistance est sensiblement la même que si chaque section cisaillée résistait à un effort de traction longitudinal. En effet, des expériences ont donné une résistance moyenne au cisaillement de $36^k,69$ par millimètre carré, et la résistance du fer à l'extension a été trouvée de 36 à 40 kilog.

Des expériences faites par M. Fairbairn ont donné, selon que deux feuilles de tôle sont réunies par un simple rang de rivets ou par deux rangs dont les rivets de l'un se croisent avec ceux de l'autre, une résistance moyenne à la rupture de $29^k,67$ et $38^k,33$ par millimètre carré de la section de la tôle faite par les axes des trous; cette dernière résistance est très-sensiblement celle de la tôle.

Quelques expériences citées par M. E. Clark tendent à faire estimer à 5000 ou 6000 kilog. le frottement produit par un seul rivet bien fait, remplissant bien son trou, et de 21 à 22 millimètres de diamètre; ce qui l'a conduit à conclure que les solides formés par des tôles ainsi assemblées résistaient comme s'ils étaient d'une seule pièce. Cette estimation paraît un peu exagérée; mais elle peut être admise dans la pratique, vu la faible charge que l'on fait supporter à la tôle, sauf à diminuer un peu le coefficient de résistance de la tôle.

MM. Gouin et C^ie^ ont fait tourner des broches en fer corroyé, dit extramartelé de Grenelle, et avec ils ont réuni deux tiges en acier trempé, dont l'une embrassait l'œil de l'autre par une fourchette bien assemblée; ces tringles, soumises à des efforts de traction, ont donné les résultats suivants :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Diamètres des broches en millimètres. . . | 8 | 10 | 12 | 16 |
| Résistance moyenne des broches par millim. | $32^k,70$ | $31^k,55$ | $31^k,48$ | $31^k,83$ |

Le même fer que les broches, tiré longitudinalement, ne s'est rompu que sous une charge de 40 kilog. par centimètre carré.

En rivant à chaud les broches qui ont donné $31^k,83$, le même appareil a fourni $32^k,55$ pour cette résistance. La faible différence de ces nombres ne serait-elle pas due à ce que les deux branches de la fourchette ne se rapprochaient pas facilement et étaient dans un certain état de poli?

**217.** Des vis à bois de $0^m,050$ de longueur, de $0^m,0056$ de diamètre en dehors des filets, et de $0^m,0028$ au noyau, engagées par 12 filets dans des planches de $0^m,027$ d'épaisseur, peuvent être chargées en toute sécurité de 35 kilog. pour le sapin, de 68 kilog. pour le chêne, de 71 kilog. pour le frêne sec, et de 59 kilog. pour l'orme.

**218.** *Résistance à l'écrasement.*

1° *Bois.*

D'après Rondelet, un cube de chêne chargé suivant la longueur de

ses fibres s'écrase sous une charge de 385 à 462 kilog. par centimètre carré de section, et un cube de sapin sous celle de 439 à 462 kilog.; de plus, cette charge de rupture reste à peu près la même tant que la longueur de la pièce ne dépasse pas 7 à 8 fois la plus petite dimension de la section transversale.

Des expériences faites par M. E. Hodgkinson sur trois cylindres en bois de teak de $0^m,0127$, $0^m,0254$ et $0^m,0508$ de diamètre, et d'une hauteur double du diamètre, prouvent que la résistance à l'écrasement est à très-peu près proportionnelle à la section.

Le même expérimentateur rapporte les résultats suivants obtenus avec des cylindres de $0^m,0254$ de diamètre et de $0^m,0508$ de hauteur. Les premiers résultats sont relatifs à des bois à l'état ordinaire de sécheresse, et les seconds à des bois ayant séjourné pendant deux mois dans une espèce d'étuve.

| ESSENCE DES BOIS. | RÉSISTANCE A L'ÉCRASEMENT par centimètre carré. | |
|---|---|---|
| | Bois à l'état ordinaire. | Bois très-sec. |
| | kil. | kil. |
| Aune | 480 | 489 |
| Frêne | 610 | 658 |
| Laurier | 528 | 528 |
| Hêtre | 543 | 658 |
| Bouleau d'Amérique | » | 820 |
| Bouleau d'Angleterre | 232 | 450 |
| Cèdre | 399 | 412 |
| Pommier sauvage | 457 | 502 |
| Sapin rouge | 404 | 463 |
| Sapin blanc | 477 | 513 |
| Sureau | 524 | 701 |
| Orme | » | 726 |
| Sapin de Prusse | 457 | 479 |
| Horn beam | 319 | 512 |
| Acajou | 576 | 576 |
| Chêne de Québec | 297 | 421 |
| Chêne anglais | 456 | 707 |
| Chêne de Dantzick très-sec | » | 543 |
| Pin résineux | 477 | 477 |
| Pin jaune rempli de térébenthine | 378 | 383 |
| Pin rouge | 379 | 528 |
| Peuplier | 218 | 360 |
| Prunier | 579 | 737 |
| Sycomore | 498 | » |
| Teak | » | 850 |
| Larix | 225 | 391 |
| Noyer | 426 | 508 |
| Saule | 203 | 431 |

D'après Rondelet, la résistance d'un cube de bois à l'écrasement

étant 1, celle des poteaux sera représentée par les nombres du tableau suivant, dans lequel $r$ désigne le rapport de la hauteur du poteau au côté de sa base:

| Rapport $r$ . . . | 1 | 12 | 24 | 36 | 48 | 60 | 72 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Résistance. . . . | 1 | $\frac{5}{6}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{3}$ | $\frac{1}{6}$ | $\frac{1}{12}$ | $\frac{1}{24}$ |

M. Morin, en représentant les résultats du tableau précédent par une courbe rectifiée, et en admettant avec Rondelet que la charge permanente des poteaux en bois peut s'élever au 1/7 de la charge de rupture, et que la résistance du cube de chêne est de 420 kilog. par centimètre carré, a formé le tableau suivant des charges que l'on peut faire supporter aux poteaux :

| Rapport $r$.. . | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 28 | 32 | 36 | 40 | 48 | 60 | 72 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Charge en kil. | 44.3 | 42.0 | 39.4 | 37.0 | 35.0 | 32.7 | 36.0 | 26.0 | 22.0 | 19.1 | 15.4 | 10.2 | 5.4 | 2.5 |

M. E. Hodgkinson a fait quelques expériences sur les poteaux en bois dont la longueur a varié de 30 à 45 fois le côté de la base, et il a reconnu que ses résultats étaient assez bien représentés, suivant que la section est carrée ou rectangulaire, par la formule

$$P = K\frac{b^4}{l^2} \quad \text{ou} \quad P = K\frac{ab^3}{l^2}.$$

P résistance à la rupture du poteau, en kilogrammes;
K coefficient constant, que M. Hodgkinson a trouvé égal à 2565 pour le chêne de Dantzick;
$b$ côté de la section carrée ou petit côté de la section rectangulaire du poteau, en centimètres;
$a$ grand côté de la section rectangulaire, en centimètres;
$l$ hauteur du poteau en décimètres.

Dans les formules précédentes, on fera :

K = 2565 pour le chêne fort;
K = 1800 pour le chêne faible;
K = 2142 pour le sapin rouge et blanc fort et le pin résineux;
K = 1600 pour le sapin blanc faible et le pin jaune.

Pour ne faire travailler les pièces qu'au dixième de la charge de rupture, il suffit simplement de diviser par 10 les valeurs précédentes de K.

Avant M. Hodgkinson, MM. Navier et Duleau ayaient déjà établi,

d'après des hypothèses, que théoriquement la résistance à l'écrasement est proportionnelle à

$$\frac{b^4}{l^2}, \text{ ou } \frac{ab^3}{l^2}, \text{ ou } \frac{d^4}{l^2},$$

selon que la section de la pièce est carrée, ou rectangulaire, ou circulaire d'un diamètre $d$.

M. Morin, en appliquant la formule précédente de M. Hodgkinson à un poteau de chêne fort de $0^m,15$ d'équarrissage, et en faisant $K = 256,5$, a obtenu les charges suivantes par centimètre carré :

| Rapport $r$.. . | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 24 | 28 | 32 | 36 | 40 | 48 | 60 | 72 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Charge en kil. | 178 | 131 | 100 | 79 | 64 | 44.5 | 32.8 | 25 | 19.8 | 16.0 | 11.1 | 7.1 | 4.9 |

Ce tableau peut être considéré comme étant d'accord avec celui de la page 262, déduit des expériences de Rondelet, pour les valeurs de $r$ comprises entre 30 et 45, c'est-à-dire pour les valeurs qui ont servi à M. Hodgkinson pour établir sa formule; mais hors de ces limites, il y a un désaccord notable.

M. Morin cite en faveur de ce dernier tableau les poteaux du rez-de-chaussée du magasin aux blés de la Villette, qui ont $0^m,31$ sur $0^m,20$ d'équarrissage et une hauteur de 32 décimètres, ce qui donne $r = 16$, et qui ont très-bien supporté à plusieurs reprises, depuis plus de 12 ans et pendant des temps assez longs, une charge de 123 kilog. par centimètre carré ; dans ces proportions, le tableau précédent ne donne que 100 kilog.

Malgré ces faits, quand il s'agit d'une matière aussi altérable que le bois, et en considération de ce que les expériences de M. Hodgkinson sont trop peu nombreuses, et qu'elles ont été faites sur des échantillons de choix, nous conseillons de ne pas atteindre les charges du tableau précédent hors des limites $r = 30$ à 45, surtout pour des constructions durables.

Les pilots enfoncés complétement dans le sol se chargent de 30 à 35 kilog., et même quelquefois plus, par centimètre carré de section (127 et fondations, 6e partie).

Pour les constructions de durée, la charge permanente des bois ne doit pas dépasser le 1/10 de la charge de rupture des pièces dans les mêmes conditions, et pour les constructions temporaires ou de peu d'importance, le 1/6 ou le 1/5 au maximum.

2° *Fonte.*

*Compression.* M. E. Hodgkinson a soumis à la compression des barres de fonte de $3^m,05$ de longueur sur $6^{cent.c.},45$ de section ; toutes les pré-

cautions étaient prises pour les empêcher de fléchir, et des résultats obtenus, il résulte que, jusque vers la charge de $17^k,41$ par millimètre carré de section, les compressions totales sont sensiblement proportionnelles aux charges, et que, jusqu'à la charge de $23^k,27$ les compressions élastiques, c'est-à-dire les compressions totales moins les compressions permanentes, sont exactement proportionnelles aux charges. Les compressions permanentes sont tellement faibles jusque vers les charges de 10 à 12 kilog. par millimètre carré qu'elles sont négligeables dans la pratique.

Le coefficient d'élasticité par compression a été en moyenne, jusqu'à la charge de $17^k,41$,

$$E = 8\,804,764\,000. \qquad (n^\circ\ 216)$$

Cette valeur n'a différé au maximum que de 1/22 de celle qui s'en est le plus écartée.

Comme on a pour l'extension $E = 9\,096,070\,000$ (page 259), on peut donc supposer que dans les limites de charges de la pratique la fonte résiste également à l'extension et à la compression, et prendre pour E la moyenne des deux valeurs précédentes, c'est-à-dire 8 950,417 000.

Les expériences antérieures à celles de M. E. Hodgkinson avaient conduit à faire $E = 12\,000,000\,000$ pour les fontes grises à grains fins (page 252).

*Charge de rupture.* Des expériences de M. E. Hodgkinson, il résulte que la résistance à la rupture est sensiblement constante pour des hauteurs de pièces variant de 1 à 5 fois la plus petite dimension de la section transversale; en deçà, la résistance est plus grande, et au delà, elle diminue considérablement à mesure que ce rapport augmente. Des expériences sur 18 espèces de fonte ont donné une résistance moyenne de 6 321 kilog. par centimètre carré; mais comme cette résistance a varié de 3965 à 11 153 d'une fonte à une autre, il y a donc lieu, dans la pratique, d'essayer les fontes que l'on veut employer. La résistance généralement admise jusqu'ici dans les ouvrages français est de 10 000 kil., nombre qu'il paraît convenable de descendre à 8 000 kilog.

M. E. Hodgkinson a soumis à des efforts de rupture par compression des piliers en fonte des forges de Low-Moor, Yorkshire, du n° 3, bonne qualité, à grains gris assez serrés et de dureté moyenne, d'une résistance maximum de 8 133 kilog. par centimètre carré, et de ses expériences, il a conclu que pour des colonnes dont la hauteur varie de 30 à 120 fois le diamètre, on a respectivement pour les colonnes pleines et les colonnes creuses

$$P = 10676\,\frac{d^{3,6}}{l^{1,7}} \quad \text{et} \quad P = 10676\,\frac{d^{3,6} - d'^{3,6}}{l^{1,7}}.$$

P effort de rupture en kilogrammes;
$d$ diamètre de la colonne pleine ou diamètre extérieur de la colonne creuse, en centimètres;

$d'$ diamètre intérieur de la colonne creuse, en centimètres ;
$l$ hauteur de la colonne en décimètres.

Pour des piliers plus courts, M. Hodgkinson donne la formule

$$P' = \frac{PR}{P + \frac{3}{4}R}.$$

P' effort de rupture, en kilogrammes ;
P effort calculé par l'une des formules précédentes ;
R résistance maximum du pilier proposé en supposant sa hauteur égale à 1 fois 1/2 son diamètre.

Comme dans la pratique il est prudent que les colonnes en fonte ne travaillent qu'au 1/6 de la charge de rupture, il faudra faire le coefficient numérique des formules précédentes égal à 1780.

Dans aucun cas, la charge permanente ne doit dépasser le 1/5 ou le 1/4 de celle de rupture.

En général on peut supposer que les fontes françaises ne s'écrasent que sous des charges d'environ 8000 kilog. par centimètre carré; mais si l'on employait des fontes d'une résistance sensiblement différente, il suffirait de multiplier le coefficient numérique des formules précédentes par le rapport de la résistance de la fonte employée à la résistance 8133 kilog.

M. Love a donné la formule suivante, plus simple que la précédente, représentant bien les résultats de M. Hodgkinson, s'appliquant à tous les piliers en fonte dont la hauteur varie de 4 à 120 fois le diamètre, et directement à une fonte quelconque,

$$P = \frac{R}{1{,}45 + 0{,}003\,37\left(\frac{l}{d}\right)^2}.$$

P charge de rupture ;
R comme ci-dessus, résistance maximum du pilier supposé très-court ;
$l$ et $d$ dimensions du pilier en centimètres.

Pour les piliers dont la hauteur $l$ varie de 5 à 30 fois le diamètre $d$, M. Love a encore donné la formule plus simple

$$P = \frac{R}{0{,}68 + 0{,}1\,\frac{l}{d}}.$$

Supposant la résistance maximum de la fonte égale à 8000 kil. par centimètre carré, en la faisant travailler au 1/6 de cette charge, de ces formules on conclut le tableau suivant :

| Rapport $r = \frac{l}{d}$ . . | < 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Charge en kil. . . . | 1333 | 746 | 476 | 297 | 195 | 169 | 98 | 74 | 58 | 46 | 38 |

Des expériences de M. E. Hodgkinson donnent pour le rapport moyen de la résistance à la rupture de la fonte par compression à la résistance par traction 6.595, et d'après cet auteur, il y a lieu de croire cette moyenne un peu faible; il pense qu'elle est comprise entre 7 et 8 pour une même fonte. D'autres expériences ne lui ont donné que 5.637 pour ce rapport moyen.

Qu'une même fonte ait été préparée à l'air froid ou à l'air chaud, sa résistance paraît être la même, soit à la traction, soit à la compression.

De ses expériences, M. E. Hodgkinson a conclu :

1° Que la résistance à la rupture d'un pilier est réduite au 1/3 au moins quand l'effort qu'il supporte est dirigé suivant la diagonale et non suivant l'axe ;

2° Que la résistance des piliers longs est 3 fois plus grande quand les extrémités sont plates et perpendiculaires à l'axe et à la direction de l'effort, que quand elles sont arrondies ;

3° Qu'un pilier long, de section uniforme, dont les extrémités sont solidement fixées par des disques, des bases, ou de toute autre manière, présente la même résistance qu'un pilier de même section et d'une longueur moitié moindre, mais dont les extrémités seraient arrondies, même si l'effort était dirigé suivant l'axe ;

4° Le renflement des colonnes vers le milieu de leur longueur n'augmente leur résistance que de 1/8 à 1/7.

Les arcs en fonte sont, d'après un relevé de 7 ponts établis, soit pour routes, soit pour chemins de fer, soumis à un effort moyen de compression de 257 kil. par centimètre carré, en tenant compte de toute surcharge. (Voir ponts métalliques.)

3° *Fer.*

*Compression.* Des expériences de M. E. Hodgkinson, il résulte que jusque vers la charge de 1400 à 1800 kilog. par centimètre carré, la compression du fer est proportionnelle à la charge, et jusqu'à cette limite d'élasticité, le coefficient d'élasticité est en moyenne,

$$E = 16\,295{,}000\,000.$$

Cette valeur de E diffère peu de celle relative à l'extension (page 259), et, comme pour la fonte, on pourra les supposer égales lorsqu'il s'agira de la résistance à la flexion.

Cette valeur est presque double de celle trouvée pour la fonte (page 264). Ainsi dans les limites de la non-altération de l'élasticité, 14 kil. par millimètre carré de section pour le fer, la fonte se com-

prime près de deux fois autant que le fer. A part le prix, il y a donc lieu de donner la préférence au fer sur la fonte.

Au delà de la limite d'élasticité, le fer se déforme beaucoup plus rapidement que la fonte, et il s'écrase sous des charges qui ne sont que la moitié et quelquefois le tiers de celles qui écrasent la fonte.

*Charge de rupture du fer et de quelques autres métaux.*

On admettait que des prismes courts en fer s'écrasaient sous des charges de 4955 kilog. par centimètre carré de section ; les dernières expériences semblent devoir faire porter ce chiffre à 4000 kil. pour le bon fer en barres laminé, et à 3800 environ pour les tôles de bonne qualité à cassure fibreuse ou cristalline, d'une épaisseur de 1/2 à 15 millimètres.

M. Love a donné pour les colonnes en fer des formules analogues à celles de la page 265 pour la fonte ; elles sont, en conservant aux lettres les mêmes significations :

Pour des hauteurs comprises entre 10 et 180 fois le diamètre,

$$P = \frac{R}{1{,}55 + 0{,}000\,5\left(\frac{l}{d}\right)^2},$$

et pour des hauteurs comprises entre 5 et 30 fois le diamètre,

$$P = \frac{R}{0{,}85 + 0{,}04\,\frac{l}{d}}.$$

Admettant que la résistance maximum du fer est de 4000 kil. par centimètre carré, en faisant travailler ce métal au 1/5 de la résistance de rupture, des formules précédentes on conclut le tableau suivant :

| Rapport $r = \frac{l}{d}$ . . | < 5 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Charge en kil. . . . | 800 | 500 | 457 | 400 | 340 | 285 | 239 | 200 | 168 | 143 | 122 |

D'après des expériences de M. E. Hodgkinson, des supports en fer disposés de manière qu'ils ne puissent fléchir, comme par exemple ceux formés de tôles épaisses réunies par des cornières et formant des cellules rectangulaires, s'écrasent sous des charges de 2500 kil. par centimètre carré de section ; en les faisant travailler du 1/6 au 1/4, soit en moyenne au 1/5 de la charge de rupture, on pourra donc les charger, comme pour la traction, d'environ 600 kil. par centimètre carré de section (page 259). Des praticiens adoptent aussi les résistances 2500

et 600 kil. pour les colonnes en fer, qui offrent alors une grande solidité.

On admet que la résistance à l'écrasement est, par centimètre carré :

| | |
|---|---|
| Pour le cuivre battu. . . . . | 7 245 kil. |
| Pour le cuivre jaune ou laiton. . . . . | 11 584 |
| Pour l'étain coulé. . . . . | 1 087 |
| Pour le plomb coulé. . . . . | 540 |

4° *Pierres.*

Il convient de n'employer les matériaux du tableau suivant comme supports isolés que pour des hauteurs qui n'atteignent pas 12 fois la plus petite dimension de la section transversale.

*TABLEAU des charges qui écrasent, après un temps très-court, différents corps, par centimètre carré de section. Ces résultats ont été obtenus en opérant sur des cubes ayant de 3 à 5 centimètres de côté.*

| DÉSIGNATION DES CORPS. | DENSITÉ. | CHARGE. |
|---|---|---|
| PIERRES VOLCANIQUES, GRANITIQUES, SILICEUSES ET ARGILEUSES. | | kil. |
| Basalte de Suède et d'Auvergne. . . . . | 2.95 | 2000 |
| Lave dure du Vésuve (*piperno*), près Pouzzol. . . . . | 2.60 | 590 |
| Lave tendre de Naples. . . . . | 1.97 | 230 |
| Porphyre. . . . . | 2.87 | 2470 |
| Granit vert des Vosges. . . . . | 2.85 | 620 |
| Granit gris de Bretagne. . . . . | 2.74 | 650 |
| Granit de Normandie, dit gatmos. . . . . | 2.66 | 700 |
| Granit gris des Vosges. . . . . | 2.64 | 420 |
| Grès très-dur, blanc ou roussâtre. . . . . | 2.50 | 870 |
| Grès tendre. . . . . | 2.49 | 4 |
| Pierre porc ou puante (argileuse). . . . . | 2.66 | 680 |
| Pierre grise de Florence (argileuse, à grain fin). . . . . | 2.56 | 420 |
| PIERRES CALCAIRES. | | |
| Marbre noir de Flandre. . . . . | 2.72 | 790 |
| Marbre blanc veiné, statuaire et turquin. . . . . | 2.69 | 310 |
| Pierre noire de Saint-Fortunat, très-dure et coquilleuse. | 2.65 | 630 |
| Roche de Châtillon, près Paris, dure et peu coquilleuse. | 2.29 | 170 |
| Liais de Bagneux, près Paris, très-dur, à grain fin. . . | 2.44 | 440 |
| Roche douce de Bagneux, près Paris. . . . . | 2.08 | 130 |
| Roche d'Arcueil, près Paris. . . . . | 2.30 | 250 |
| Pierre de Saillancourt, près Pontoise. . { 1re qualité. . | 2.41 | 140 |
| { 2e qualité. . | 2.10 | 90 |
| Pierre ferme de Conflans, employée à Paris. . . . . | 2.07 | 90 |
| Pierre tendre (lambourde et vergelée), employée à Paris, résistant à l'eau. . . . . | 1.82 | 60 |
| Lambourde de qualité inférieure, résistant mal à l'eau. . | 1.56 | 20 |
| Calcaire dur de Givry, près Paris. . . . . | 2.36 | 310 |
| Calcaire tendre de Givry, près Paris. . . . . | 2.07 | 120 |

| DÉSIGNATION DES CORPS. | DENSITÉ. | CHARGE. |
|---|---|---|
| | | kil. |
| Calcaire jaune oolithique de Jaumont, près Metz. (1re qualité.. | 2.20 | 180 |
| (2e qualité.. | 2.00 | 120 |
| Calcaire jaune d'Amanvilliers, près Metz. (1re qualité. | 2.00 | 120 |
| (2e qualité. | 2.00 | 100 |
| Roche vive de Saulny, près Metz (non rompue). | 2.55 | 300 |
| Roche jaune de Rozérieulles, près Metz. | 2.40 | 180 |
| Calcaire bleu à gryphite, donnant la chaux hydraulique de Metz (non rompue). | 2.60 | 300 |
| BRIQUES. | | |
| Brique dure, très-cuite. | 1.56 | 150 |
| Brique rouge. | 2.17 | 60 |
| Brique rouge pâle (probablement mal cuite). | 2.09 | 40 |
| Brique de Hammersmith. | » | 70 |
| Brique de Hammersmith (brûlée ou vitrifiée). | » | 100 |
| Brique anglaise ou flamande tendre. | » | 18 |
| PLATRES ET MORTIERS. | | |
| Plâtre gâché à l'eau. | » | 50 |
| Plâtre gâché au lait de chaux. | » | 73 |
| Mortier ordinaire en chaux et sable. | 1.60 | 35 |
| Mortier en ciment ou tuileaux pilés. | 1.46 | 48 |
| Mortier en grès pilé. | 1.68 | 29 |
| Mortier en pouzzolane de Naples ou de Rome. | 1.46 | 37 |
| Enduit d'une conserve antique, près de Rome. | 1.55 | 76 |
| Enduit en ciment des démolitions de la Bastille. | 1.49 | 55 |
| Béton en bon mortier, de 18 mois. | » | 40 |
| *D'après les expériences de* M. Vicat *sur des cubes de 1 centimètre de côté.* | | |
| Pierre calcaire à tissu arénacé (sablonneuse). | » | 94 |
| *Id.* à tissu oolithique (globuleuse). | » | 106 |
| *Id.* à tissu compacte (lithographique). | » | 285 |
| Brique crue, ou argile séchée à l'air libre. | » | 33 |
| Plâtre ordinaire, gâché ferme. | » | 90 |
| *Id.* gâché moins ferme que le précédent. | » | 42 |
| Mortier en chaux grasse et sable ordinaire, âgé de 14 ans. | » | 19 |
| *Id.* hydraulique ordinaire. | » | 74 |
| *Id.* éminemment hydraulique. | » | 144 |
| *D'après des expériences récentes faites au Conservatoire des Arts et Métiers.* | | |
| 1° PIERRES CALCAIRES. | | |
| Roches de Bagneux. cubes de $0^m.06$ sur $0^m.06$. | 2.777 | 731 |
| Larversine. *id.* | 2.546 | 372 |
| Vitry. *id.* | 2.453 | 484 |
| Moulin. *id.* | 2.296 | 249 |
| Saint-Non. *id.* | » | 432 |
| Forgel. *id.* | 2.245 | 244 |
| Marly-la-Ville. cubes de $0^m.082$ sur $0^m.082$. | 2.065 | 246 |
| Vergelé-Ferré. *id.* | 1.887 | 125 |

| DÉSIGNATION DES CORPS. | DENSITÉ. | CHARGE. |
|---|---|---|
| | | kil. |
| Abbaye Duval. . . . . cubes de 0m.082 sur 0m.082. . | 1.727 | 64.3 |
| Banc-Royal, de Merry. . . . . *id.* . . . . . | 1.722 | 61.5 |
| Vergelé fin. . . . . *id.* . . . . . | 1.497 | 41.9 |
| Lambourde. . . . . *id.* . . . . . | 1.696 | 36.4 |
| Calcaire de Caumont (Eure). . . . 0m.08 sur 0m.08. . . | 2.020 | 424 |
| 2° GRÈS BIGARRÉ DES VOSGES. | | |
| Niederwiller. . . . . cubes de 0m.08 sur 0m.08. . . | 2.170 | 460 |
| Witzbourg. . . . . *id.* . . . . . | » | 412 |
| Bréménil. . . . . *id.* . . . . . | » | 442 |
| Kibolo. . . . . *id.* . . . . . | » | 419 |
| Arscheviller. . . . . *id.* . . . . . | » | 362 |
| Merwiller. . . . . *id.* . . . . . | » | 294 |
| 3° CUBES ARTIFICIELS EN PLATRE ET SILICE. | | |
| Plâtre silicaté sans cailloux; cubes pleins de 0m.20 de côté. | » | 49.50 |
| *Id.* avec cailloux.. . . . . *id.* . . . . . | » | 64.32 |
| *Id.* sans cailloux } cube de 0m.20 de côté, évidés de manière à diminuer de | » | 58.38 |
| *Id.* avec cailloux } 1/4 la section résistante.. | » | 66.77 |

Dans la pratique, la charge permanente qu'il convient de faire supporter aux matériaux du tableau précédent n'est que le 1/10 de celle qui produit la rupture; dans les constructions les plus légères elle ne dépasse pas le 1/6, et dans les constructions de moellons ou de petits matériaux, et souvent de pierres de taille, il convient de la réduire à 1/15 et même à 1/20; il en est de même pour les supports isolés dont le rapport de la hauteur à la plus petite dimension de la section tranversale est très-grand.

On a remarqué que les pierres soumises à l'écrasement résistent d'autant mieux que leur section se rapproche davantage de la forme circulaire; ainsi, pour deux pierres de même hauteur, dont l'égale section était carrée pour la première et circulaire pour la deuxième, les résistances ont été dans le rapport des nombres 8 et 9. On a remarqué aussi que la résistance d'un cube étant 1, celle du cylindre inscrit est 0,80 quand il repose sur sa base, et 0,32 quand il repose sur une arête, et que celle de la sphère inscrite est 0,26.

**219.** *Section d'une bielle.* Pour les machines à basse pression, Watt fait la section de la bielle en fonte égale au 1/28 de celle du piston, ce qui correspond à une charge de 28 kilog. par centimètre carré; aux extrémités, la section est 1/35, et la charge 35 kilog.

Pour les bielles en fer forgé, la charge peut varier de 50 à 60 kilog. au milieu, et de 90 à 100 kilog. aux extrémités.

De ses expériences, M. E. Hodgkinson conclut qu'à section égale une bielle à section cruciforme, ordinairement employée, est moins résistante qu'une bielle à section annulaire dans le rapport de 18 à 40 environ.

**220.** *Résistance à un effort transversal, d'une pièce prismatique encastrée par une de ses extrémités et sollicitée à l'autre par une force unique* P. Le point d'encastrement étant évidemment celui où les fibres qui composent la pièce ont à supporter le plus grand effort, c'est pour ce point qu'il faut calculer les dimensions de la pièce, dont la résistance totale se compose de la somme des résistances à la traction et à la compression de toutes les fibres qui composent la section d'encastrement. Il faut dire à la traction et à la compression; car des fibres sont tirées, d'autres comprimées, et il y a une ligne de *fibres invariables* qui sépare les précédentes.

Ce qui va suivre suppose que la résistance à la traction est égale à la résistance à la flexion, ce qui n'est vrai que dans les limites d'élasticité, c'est-à-dire dans les limites où les raccourcissements et allongements sont égaux entre eux et proportionnels aux charges (216 et 218). Comme, dans la pratique, il ne faut jamais dépasser ces limites, les formules suivantes satisferont donc aux applications.

Le moment de résistance de la pièce, c'est-à-dire la somme des moments de résistance de toutes les fibres pris par rapport à la ligne des fibres invariables, est égal au moment de la force P pris par rapport à la section d'encastrement; on peut donc poser (*Int.*, 1418)

$$PL = \frac{RI}{n}. \qquad (1)$$

$L$ bras de levier de la force P, ou distance du point d'encastrement de la pièce au point d'application de P;

$\frac{RI}{n}$ moment de résistance de la pièce;

$R$ plus grande résistance à la traction et à la compression, sans dépasser la limite d'élasticité, des fibres qui composent la section d'encastrement de la pièce sollicitée perpendiculairement à sa longueur;

$I$ moment d'inertie de la section d'encastrement pris par rapport à la ligne des fibres invariables; on le représente par $\int v^2 d\omega$, c'est-à-dire qu'il est la somme des produits des divers éléments $d\omega$ qui composent la section de rupture par le carré de la distance variable $v$ de chaque élément à la ligne des fibres invariables (101);

$n$ distance de la ligne des fibres invariables au point de la section d'encastrement qui en est le plus éloigné. La ligne des fibres invariables passant par le centre de gravité de la section, il sera toujours facile de déterminer la valeur de $n$ (*Int.*, 1435).

La flèche est donnée par la formule

$$\frac{PL^3}{3} = EIf. \qquad (2)$$

E module ou coefficient d'élasticité (216 et 218);
EI *moment d'élasticité* de la pièce;
*f* flèche produite ou quantité dont s'abaisse le point d'application P dans la direction de cette force.

*Comme, pour une pièce prismatique à section rectangulaire, on a*

$$n = \frac{h}{2},$$

et que le moment d'inertie est

$$\mathrm{I} = \frac{bh^3}{12},$$

les deux formules fondamentales (1) et (2) deviennent, en remplaçant $n$ et I par leurs valeurs,

$$\mathrm{PL} = \frac{\mathrm{R}bh^2}{6}, \qquad (1')$$

et

$$\frac{\mathrm{PL}^3}{3} = \frac{\mathrm{E}bh^3 f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{4\mathrm{PL}^3}{\mathrm{E}bh^3}; \qquad (2')$$

*b* largeur de la section transversale de la pièce, ou dimension de cette section perpendiculaire à la direction de la force P;
*h* hauteur de la pièce, ou dimension de la section transversale parallèle à la direction de la force P.

Le membre $\frac{\mathrm{R}bh^2}{6}$ de l'équation (1') étant connu pour une pièce de section rectangulaire donnée, on en conclura la valeur de P ou celle de L, l'une ou l'autre de ces quantités étant connue. Si les valeurs de P et L étaient déterminées d'avance, de cette même équation on tirerait celles de $b$ et $h$, en établissant entre $b$ et $h$ un rapport convenable à la pratique. Pour les pièces de fonte sans nervure on fait $b = \frac{1}{12}h$ au minimum, $b = \frac{1}{4}h$ au maximum et $b = \frac{1}{8}h$ en moyenne. Pour le bois, on fait varier $b$ entre $\frac{1}{3}$ et $\frac{1}{2}$ de $h$, et même, pour les pièces isolées, il convient de faire $b = \frac{5}{7}h$.

P *étant exprimé en kilogrammes, et les quantités* L, b, h *et* f *en mètres, on a pour* E *et* R *les valeurs du tableau suivant; les premières valeurs de* R *sont les moyennes des cas ordinaires de la pratique, et les secondes supposent des matériaux de choix et des constructions plus légères.*

| DÉSIGNATION DES MATIÈRES. | VALEUR DE E. | VALEUR DE R qu'on ne doit pas dépasser dans la pratique. |
|---|---|---|
| Chêne. . . . . | 1 200 000 000 | 550 000 à 750 000 |
| Sapin jaune ou blanc. . . . . | 1 300 000 000 | 600 000 à 800 000 |
| Arcs en planches. . . . . | 500 000 000 | 250 000 à 300 000 |
| Fer doux forgé. . . . . | 20 000 000 000 | 6 000 000 à 10 000 000 |
| Fer laminé en barres et tubes en tôle. | 12 000 000 000 | 4 700 000 à 7 800 000 |
| Acier d'Allemagne. . . . . | 21 000 000 000 | 12 500 000 à 16 600 000 |
| Acier fondu. . . . . | 30 000 000 000 | 16 600 000 à 22 000 000 |
| Fonte grise à grain fin. . . . . | 12 000 000 000 | 7 500 000 à 10 000 000 |
| Fonte grise ordinaire, anglaise.. . . | 9 000 000 000 | 5 600 000 à 7 500 000 |

*Application.* Quelles doivent être les valeurs de $h$ et $b$, d'une pièce de sapin encastrée par une extrémité, pour $P = 500$ kilog. et $L = 1^m,50$, en négligeant le poids de la pièce?

Faisant $b = \frac{5}{7} h$ et remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule (1'), on a

$$500 \times 1,5 = \frac{600000 \times 5 \times h^3}{7 \times 6}, \quad \text{d'où} \quad h = \sqrt[3]{\frac{500 \times 1,5 \times 7 \times 6}{600000 \times 5}} = 0^m,219,$$

et par suite

$$b = \frac{5}{7} \times 0,219 = 0^m,156,$$

on a

$$f = \frac{4 \times 500 \times (1,5)^3}{1\,300\,000\,000 \times 0,156 \times (0,219)^3} = 0^m,0031.$$

*Valeur de* I *pour une pièce d'un profil quelconque.* Chacune des deux parties séparées par la ligne des fibres invariables donne, pour une pièce rectangulaire,

$$I = \frac{bh^3}{24}.$$

Supposant la ligne des fibres invariables d'une résistance indéfinie, effet que produit chaque partie de la pièce par rapport à l'autre, on pourra supprimer l'une des parties, et on aura $h = \frac{h}{2}$, et par suite

$$I = \frac{bh^3}{3}.$$

Cela établi, pour un profil quelconque, on déterminera son centre de gravité, soit par les moyens connus, soit par la formule de Simpson

(*Int.*, 1458), on mènera par ce centre de gravité la ligne figurant les fibres invariables, on divisera la longueur de cette ligne en un nombre pair $m$ de parties égales, et par les points de division on mènera des perpendiculaires à cette ligne; $m$ ayant été pris assez grand pour que l'on puisse considérer les profils compris entre les perpendiculaires comme rectangulaires, chaque profil élémentaire, au-dessus ou au-dessous de la ligne des fibres invariables, se trouvera dans les conditions de la dernière formule, et pour l'ensemble des profils élémentaires compris d'un même côté de la ligne des fibres invariables, la formule de Simpson donnera, $h_0$, $h_1$, $h_2$.....$h_m$ étant les plus grandes hauteurs des profils élémentaires,

$$I = \frac{b}{3 \times 3m}[h^3{}_0 + h^3{}_m + 4(h^3{}_1 + h^3{}_3 + \ldots + h^3{}_{m-1}) + 2(h^3{}_2 + h^3{}_4 + \ldots + h^3{}_{m-2})].$$

Pour la partie de profil située de l'autre côté de la ligne des fibres invariables, on calculera I par la même formule, dans laquelle il n'y aura que les valeurs de $h_0$, $h_1$..... de changées; ajoutant ces deux valeurs trouvées, on aura celle de I pour tout le profil.

*Si la section transversale du solide est un carré dont le côté est* q, on a, dans le cas où il est fléchi dans le sens d'un côté,

$$n = \frac{q}{2} \quad \text{et} \quad I = \frac{q^4}{12};$$

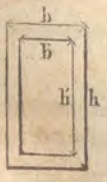
les formules (1) et (2) deviennent alors

$$PL = \frac{Rq^3}{6},$$

et

$$\frac{PL^3}{3} = \frac{Eq^4}{12} f, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{4PL^3}{Eq^4}.$$

Fig. 48.




*Si la coupe transversale du solide prismatique encastré par une de ses extrémités et sollicité à l'autre par la force* P *a la forme indiquée fig.* 48, on a

$$n = \frac{h}{2} \quad \text{et} \quad I = \frac{bh^3 - b'h'^3}{12};$$

et les formules (1) et (2) deviennent

$$PL = \frac{R(bh^3 - b'h'^3)}{6h},$$

et

$$\frac{PL^3}{3} = \frac{E(bh^3 - b'h'^3)f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{4PL^3}{E(bh^3 - b'h'^3)}.$$

Comme le font voir ces formules, ce solide est considéré comme étant la différence de deux autres.

Fig. 49.




*Si le solide, au lieu d'être évidé au milieu, l'était latéralement*, comme l'indique la *fig.* 49, on aurait encore

$$n = \frac{h}{2} \quad \text{et} \quad \mathrm{I} = \frac{bh^3 - b'h'^3}{12},$$

et par suite

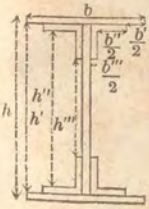
$$\mathrm{PL} = \frac{\mathrm{R}(bh^3 - b'h'^3)}{6h},$$

et

$$\frac{\mathrm{PL}^3}{3} = \frac{\mathrm{E}(bh^3 - b'h'^3)f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{4\mathrm{PL}^3}{\mathrm{E}(bh^3 - b'h'^3)}.$$

Dans le cas où les nervures $b$ sont renforcées par des cornières, comme cela arrive pour les poutres en tôle employées à la construction des ponts (*fig.* 50), on a

Fig. 50.




$$n = \frac{h}{2} \quad \text{et} \quad \mathrm{I} = \frac{bh^3 - (b'h'^3 + b''h''^3 + b'''h'''^3)}{12};$$

par suite,

$$\mathrm{PL} = \frac{\mathrm{R}(bh^3 - b'h'^3 - b''h''^3 - b'''h'''^3)}{6h}$$

et

$$\frac{\mathrm{PL}^3}{3} = \frac{\mathrm{E}(bh^3 - b'h'^3 - b''h''^3 - b'''h'''^3)f}{12},$$

d'où

$$f = \frac{4\mathrm{PL}^3}{\mathrm{E}(bh^3 - b'h'^3 - b''h''^3 - b'''h'''^3)}.$$

Quand la section de la pièce n'a pas d'axe de symétrie horizontal, la ligne des fibres n'est pas au milieu de la hauteur de la pièce, c'est-à-dire qu'on n'a pas $n = \frac{h}{2}$; alors on a recours à la marche indiquée page 273 pour une section quelconque; seulement les formes rectangulaires des différentes parties du profil permettent d'abréger considérablement les calculs, soit pour obtenir $n$, en faisant usage des moments (*Int.*, 1437); soit pour déterminer la valeur de I.

Fig. 51.




*Dans le cas où la section transversale a la forme d'un* T, comme l'indique la *fig.* 51, on obtient

$$n = \frac{1}{2} \times \frac{bh'^2 - b'h'^2 + b'h^2}{bh' - b'h' + b'h},$$

$$I = \frac{1}{3}\left[bn^3 - (b - b')(n - h')^3 + b'(h - n)^3\right];$$

puis

$$PL = \frac{R}{3} \times \frac{bn^3 - (b - b')(n - h')^3 + b'(h - n)^3}{h - n},$$

et

$$\frac{PL^3}{3} = EIf, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{PL^3}{E\left[bn^3 - (b - b')(n - h')^3 + b'(h - n)^3\right]}.$$

Fig. 52.




*La section du solide étant un parallélogramme dont la diagonale* b *est perpendiculaire à la direction de la force* P, *fig.* 52, on a

$$n = h \quad \text{et} \quad I = \frac{bh^3}{6};$$

les formules (1) et (2) deviennent

$$PL = \frac{Rbh^2}{6},$$

et

$$\frac{PL^3}{3} = \frac{Ebh^3f}{6}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{2PL^3}{Ebh^3}.$$

*Si la section était un carré ayant* q *pour côté*, on aurait $b = \frac{2q}{\sqrt{2}}$ et $h = \frac{q}{\sqrt{2}}$, et ces valeurs substituées dans les formules précédentes donneraient

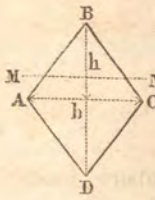
$$PL = \frac{Rq^3}{6\sqrt{2}},$$

et

$$\frac{PL^3}{3} = \frac{Eq^4f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{4PL^3}{Eq^4}.$$

La flèche est la même que si la pièce était fléchie dans lesens des côtés de la section (voir ce cas, page 274).

Fig. 53.




*Si la section est un losange* ABCD (*fig.* 53), les formules sont les mêmes que pour le parallélogramme (*fig.* 52).

*Pour une section triangulaire* ABD, moitié du losange (*fig.* 53), on aurait, $b$ étant toujours égal à AC, et $h$ à $\frac{BD}{2}$,

$$PL = \frac{Rbh^2}{12},$$

et

$$\frac{PL^3}{3} = \frac{Ebh^3 f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{4PL^3}{Ebh^3}.$$

Ce qui fait voir que les valeurs de PL et $f$ sont respectivement moitié et double de celles données par le losange entier.

*Lorsque la section d'un solide est un triangle* ABC (*fig.* 53), et que la ligne d'inertie ou des fibres invariables MN est parallèle à l'un des côtés, on a

$$n = \frac{2}{3}h \quad \text{et} \quad I = \frac{1}{36}bh^3;$$

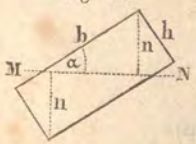
d'où on conclut, en substituant ces valeurs dans les formules (1) et (2),

$$PL = \frac{Rbh^2}{24},$$

et

$$\frac{PL^3}{3} = \frac{Ebh^3 f}{36}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{12PL^3}{Ebh^3}.$$

Fig. 54.




*La section du solide étant un rectangle disposé de manière que la ligne d'inertie* MN *fasse avec le côté* b *un angle* $\alpha$ (*fig.* 54), on a (*Int.*, 995) :

$$n = \frac{1}{2}(b\sin\alpha + h\cos\alpha) \quad \text{et} \quad I = \frac{Rbh}{12}(b^2\sin^2\alpha + h^2\cos^2\alpha);$$

d'où on conclut, pour les formules (1) et (2),

$$PL = \frac{Rbh}{6} \times \frac{b^2\sin^2\alpha + h^2\cos^2\alpha}{b\sin\alpha + h\cos\alpha},$$

et

$$\frac{PL^3}{3} = \frac{Ebhf}{12}(b^2\sin^2\alpha + h^2\cos^2\alpha), \quad \text{d'où} \quad f = \frac{4PL^3}{Ebh(b^2\sin^2\alpha + h^2\cos^2\alpha)},$$

Si $\alpha = 0$, on a $\sin\alpha = 0$, $\cos\alpha = 1$, et par suite

$$PL = \frac{Rbh^2}{6},$$

et

$$\frac{PL^3}{3} = \frac{Eb h^3 f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{4PL^3}{Eb h^3};$$

valeurs déjà trouvées, page 272, pour la section rectangulaire, quand la pièce est fléchie dans le sens des côtés de cette section.

*La section du solide étant un cercle de rayon* r, on a

$$n = r \quad \text{et} \quad I = \frac{\pi r^4}{4};$$

ce qui donne, pour les formules (1) et (2),

$$PL = \frac{R\pi r^3}{4},$$

et

$$\frac{PL^3}{3} = \frac{\pi E r^4 f}{4}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{4PL^3}{3\pi E r^4}.$$

De ce qui précède, il résulte que le moment de résistance du carré est à celui du cercle inscrit dans le rapport de 1 à $\frac{3\pi}{16}$.

*Si le solide est un cylindre creux*, $r$ étant son rayon extérieur et $r'$ son rayon intérieur, on a

$$n = r \quad \text{et} \quad I = \frac{\pi}{4}(r^4 - r'^4),$$

d'où on conclut, pour les formules (1) et (2),

$$PL = \frac{R\pi(r^4 - r'^4)}{4r},$$

et

$$\frac{PL^3}{3} = \frac{\pi E f}{4}(r^4 - r'^4), \quad \text{d'où} \quad f = \frac{4PL^3}{3\pi E(r^4 - r'^4)}.$$

Pour $r' = mr$, il vient

$$PL = \frac{R\pi}{4} r^3(1 - m^4), \quad \text{et} \quad f = \frac{4PL^3}{3\pi E r^4(1 - m^4)}.$$

En faisant $r' = 0$ ou $m = 0$ dans ces formules, on obtiendrait celles données pour le cylindre plein.

*Pour un solide à section elliptique* dont $2h$ est l'axe vertical et $2b$ l'axe horizontal (*Int.*, 1041), on a

$$n = h \quad \text{et} \quad I = \frac{\pi}{4} bh^3,$$

et les formules (1) et (2) deviennent

$$PL = \frac{R\pi bh^2}{4},$$

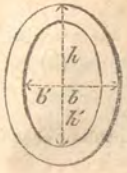
et

$$\frac{PL^3}{3} = \frac{\pi E b h^3 f}{4}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{4PL^3}{3\pi E b h^3}.$$

Pour $b = h$, on rentrerait dans les formules relatives à la sectio circulaire.

*Pour un solide creux à section elliptique*, $2h$ et $2b$ étant les axes de l'ellipse extérieure, et $2h'$ et $2b'$ ceux de l'ellipse intérieure (*fig.* 55), on a

Fig. 55.




$$n = h \quad \text{et} \quad I = \frac{\pi}{4}(bh^3 - b'h'^3),$$

et les formules (1) et (2) deviennent

$$PL = \frac{R\pi(bh^3 - b'h'^3)}{4h},$$

et

$$\frac{PL^3}{3} = \frac{\pi E f}{4}(bh^3 - b'h'^3), \quad \text{d'où} \quad f = \frac{4PL^3}{3\pi E(bh^3 - b'h'^3)}.$$

Si les ellipses intérieure et extérieure sont semblables, c'est-à-dire si on a $b' = mb$ et $h' = mh$, les formules précédentes donnent

$$PL = \frac{R\pi}{4} bh^2(1 - m^4), \quad \text{et} \quad f = \frac{4PL^3}{3\pi E b h^3(1 - m^4)}.$$

Pour $b' = h' = 0$, c'est-à-dire pour $m = 0$, les formules précédentes deviennent celles posées pour la section elliptique pleine, et pour $b = h$ et $b' = h'$, elles fournissent les formules relatives aux sections circulaires, ce qui devait évidemment arriver.

**221.** *Si la pièce repose sur un appui placé en un des points de sa longueur, et qu'elle soit sollicitée à ses extrémités par deux forces qui se font équilibre autour de ce point d'appui*, on a, pour une pièce prismatique à section rectangulaire,

$$\frac{pl + ql'}{2} = \frac{Rbh^2}{6}. \qquad \text{(n° 220, page 272.)}$$

$l$ bras de levier de la force $p$ qui sollicite une des extrémités de la pièce;
$l'$ bras de levier de la force $q$ qui sollicite l'autre extrémité de la pièce;
$l + l' = L$ longueur de la pièce;
$p + q = P$ charge totale que supporte la pièce.

Si le point d'appui est au milieu de la longueur de la pièce, on a $l = l' = \frac{L}{2}$, par suite, $p = q = \frac{P}{2}$, et la formule précédente devient

$$\frac{PL}{4} = \frac{Rbh^2}{6}.$$

Pour les autres sections de pièce, il suffirait de remplacer PL par $\frac{pl + ql'}{4}$ ou par $\frac{PL}{4}$ dans les formules du numéro précédent.

**222.** *La charge sollicitant une pièce prismatique encastrée par une de ses extrémités, au lieu d'être appliquée à l'extrémité de la pièce, peut être répartie uniformément sur toute sa longueur.* Dans ce cas, les deux formules fondamentales (1) et (2) du n° 220 deviennent

$$pL \times \frac{L}{2} = \frac{RI}{n} \quad \text{ou} \quad \frac{pL^2}{2} = \frac{RI}{n}, \tag{1}$$

et

$$\frac{1}{8} pL \times L^3 = EIf \quad \text{ou} \quad \frac{pL^4}{8} = EIf. \tag{2}$$

Les lettres L, R, I, $n$, E et $f$ ont les mêmes significations qu'au n° 220 ;

$p$ charge par mètre de longueur de la pièce ; c'est, par exemple, le poids de chaque mètre de longueur de la pièce ;

$pL$ charge totale ;

$\frac{L}{2}$ bras de levier de la résultante du poids total $pL$.

En comparant la formule précédente (1) avec la formule analogue (1) du n° 220, on voit qu'une même pièce peut supporter une charge totale $pL$, répartie uniformément sur toute sa longueur, double de la charge P qu'elle supporte quand P est appliquée à l'extrémité de sa longueur, et en comparant la formule précédente (2) avec la formule analogue (2) du n° 220, on voit qu'une même pièce donne, pour une même charge, une flèche $f$ qui n'est, pour le cas où la charge est uniformément répartie, que les 3/8 de celle produite par la même charge appliquée à l'extrémité de la pièce ; ce qui revient à dire que pour produire une même flèche, la charge uniformément répartie doit être au poids unique appliqué à l'extrémité de la pièce dans le rapport de 8 à 3.

En remplaçant, dans les formules (1) et (2), $n$ et I par les différentes valeurs qui conviennent aux formes des sections transversales des pièces, on obtiendra des formules semblables à celles du n° 220 ; ainsi, pour une pièce prismatique à section rectangulaire, on aura

$$\frac{pL^2}{2} = \frac{Rbh^2}{6},$$

et

$$\frac{pL^4}{8} = \frac{Ebh^3 f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{3pL^4}{2Ebh^3}.$$

Pour les données de l'application de la page 273, c'est-à-dire pour $L = 1^m,50$ et $pL = 500$ kilog., remplaçant les lettres par leurs valeurs dans les formules précédentes, on tire $h = 0^m,174$, $b = 0^m,124$ et $f = 0^m,0031$.

223. *La pièce peut être chargée d'un poids* P *appliqué à son extrémité, et d'un poids* pL *réparti uniformément sur toute sa longueur.* (Ce cas se présente particulièrement toutes les fois, qu'outre le poids P, on est obligé de tenir compte du poids de la pièce prismatique). Dans ce cas, les formules (1) et (2) des n^os^ 220 et 222 deviennent, en conservant aux mêmes lettres les mêmes significations,

$$PL + \frac{pL^2}{2} = \frac{RI}{n} \quad \text{ou} \quad \left(P + \frac{pL}{2}\right) L = \frac{RI}{n}, \tag{1}$$

et

$$\frac{PL^3}{3} + \frac{pL^4}{8} = EIf \quad \text{ou} \quad \left(\frac{P}{3} + \frac{pL}{8}\right) L^3 = EIf. \tag{2}$$

En remplaçant $n$ et I par les valeurs qui conviennent aux sections des pièces, on obtient des formules semblables à celles des n^os^ 220 et 222; ainsi, pour une pièce à section rectangulaire, on a

$$\left(P + \frac{pL}{2}\right) L = \frac{Rbh^2}{6},$$

et

$$\left(\frac{P}{3} + \frac{pL}{8}\right) L^3 = \frac{Ebh^3 f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{12\left(\frac{P}{3} + \frac{pL}{8}\right) L^3}{Ebh^3}.$$

224. *Pièce reposant sur deux appuis placés à ses extrémités.* Supposons d'abord que l'on puisse négliger le poids de la pièce, et qu'elle soit chargée d'un poids P placé au milieu de sa longueur. Dans ce cas, la pièce travaillant comme si elle était encastrée au milieu de sa longueur et sollicitée à chacune de ses extrémités par une force égale à $\frac{P}{2}$, toutes les formules posées au n° 220 se reproduiront; seulement P sera remplacé par $\frac{P}{2}$ et L par $\frac{L}{2}$; ainsi, pour une pièce prismatique, les deux formules fondamentales (1) et (2) deviendront, en conservant aux lettres les mêmes significations,

$$\frac{PL}{4} = \frac{RI}{n}, \tag{1}$$

et

$$\frac{PL^3}{48} = EIf. \tag{2}$$

Comparant ces formules avec celles (1) et (2) obtenues n° 220, on voit qu'une même pièce supporte, dans le cas où elle repose sur deux appuis, une charge quatre fois plus grande que quand elle est seulement encastrée par une extrémité et chargée à l'autre, et que, pour un même poids, la flèche est seize fois plus petite.

Remplaçant $n$ et I par les valeurs qui conviennent aux sections transversales des pièces, on obtiendra des formules semblables à celles posées au n° 220; ainsi, pour une pièce à section rectangulaire, on a

$$\frac{PL}{4} = \frac{Rbh^2}{6},$$

et

$$\frac{PL^3}{48} = \frac{Ebh^3f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{PL^3}{4Ebh^3}.$$

225. *Si la charge est uniformément répartie sur toute la longueur de la pièce*, $p$ étant la charge par mètre de longueur, la charge totale est $pL$, dont la moitié est $\frac{pL}{2}$, et les formules fondamentales (1) et (2) (224) deviennent

$$\frac{pL^2}{8} = \frac{RI}{n}, \tag{1}$$

et

$$\frac{1}{48} \times \frac{5}{8} pL^4 = EIf, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{5pL^4}{384EI}. \tag{2}$$

Ces formules font voir que le poids $pL$ est double de celui supporté par la même pièce chargée en son milieu, et que la flèche est les 5/8 de celle produite par le même poids appliqué au milieu de la longueur de la pièce.

Pour une pièce prismatique à section rectangulaire, on a, en remplaçant $n$ et I par les valeurs qui conviennent à cette section (220),

$$\frac{pL^2}{8} = \frac{Rbh^2}{6},$$

et

$$\frac{1}{48} \times \frac{5}{8} pL^4 = \frac{Ebh^3f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{\frac{5}{8} pL^4}{4Ebh^3} = \frac{5pL^4}{32Ebh^3}.$$

226. *Si la pièce était chargée d'un poids* P *au milieu de sa longueur, et d'un poids* p *par mètre réparti uniformément sur sa longueur*, on aurait (224 et 225),

$$\frac{PL}{4} + \frac{pL^2}{8} \quad \text{ou} \quad \left(P + \frac{pL}{2}\right)\frac{L}{4} = \frac{RI}{n}, \qquad (1)$$

et

$$\frac{PL^3}{48} + \frac{1}{48} \times \frac{5}{8} pL^4 \quad \text{ou} \quad \left(P + \frac{5}{8} pL\right)\frac{L^3}{48} = EIf. \qquad (2)$$

Pour une pièce prismatique à section rectangulaire on a donc, en remplaçant $n$ et I par leurs valeurs (220),

$$\left(P + \frac{pL}{2}\right)\frac{L}{4} = \frac{Rbh^2}{6},$$

et

$$\left(P + \frac{5}{8} pL\right)\frac{L^3}{48} = \frac{Ebh^3 f}{12}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{\left(P + \frac{5}{8} pL\right)L^3}{4Ebh^3}.$$

**227.** *La pièce reposant toujours sur deux appuis,* il peut arriver que le poids unique P qu'elle supporte soit placé en un point quelconque de sa longueur. On a alors

$$\frac{Pll'}{L} = \frac{RI}{n}. \qquad (1)$$

$l$ et $l'$ distances du point d'application de P aux appuis, $l + l' = L$.

Pour une pièce à section rectangulaire, on a, en remplaçant $n$ et par leurs valeurs (220),

$$\frac{Pll'}{L} = \frac{Rbh^2}{6}.$$

Si le poids était appliqué au milieu de L, on aurait $l = l' = \frac{L}{2}$, et cette valeur, substituée dans ces deux dernières formules, reproduirait les formules déjà trouvées pour ce cas au n° 224.

La pièce étant chargée, en outre du poids P placé en un point quelconque de sa longueur, d'un poids $p$ par mètre réparti uniformément, on a

$$\left(P + \frac{pL}{2}\right)\frac{ll'}{L} = \frac{RI}{n}. \qquad (1)$$

Pour une pièce à section rectangulaire, cette formule devient, en remplaçant $n$ et I par leurs valeurs (220),

$$\left(P + \frac{pL}{2}\right)\frac{ll'}{L} = \frac{Rbh^2}{6}.$$

Pour $l = l' = \frac{L}{2}$, c'est-à-dire pour le cas où P est placé au milieu de

la longueur de la pièce, ces deux formules fournissent celles trouvées pour cette manière d'être chargée de la pièce (226).

**223.** *Pièce prismatique dont une extrémité est encastrée, tandis que l'autre repose librement sur un appui.* Représentons par

P un poids placé en un point quelconque de la pièce ;
$p$ une charge par mètre répartie uniformément sur la longueur de la pièce ;
L la longueur de la pièce ;
$l$ et $l'$ les distances respectives du point d'application du poids P au point d'encastrement et au point d'appui ;
$q$ la pression exercée par la pièce sur le point d'appui.

Pour un point quelconque pris sur $l$, on a, en désignant par $x$ sa distance au point d'encastrement, et en supposant que la section de la pièce est rectangulaire (220),

$$\frac{\mathrm{RI}}{n} = \frac{\mathrm{R}bh^2}{6} = \mathrm{P}(l-x) + \frac{p}{2}(\mathrm{L}-x)^2 - q(\mathrm{L}-x). \qquad (a)$$

Si le point est pris sur $l'$, et à une distance $x'$ du point d'encastrement, le moment de rupture est, en supposant la pièce à section rectangulaire,

$$\frac{\mathrm{RI}}{n} = \frac{\mathrm{R}bh^2}{6} = \frac{p}{2}(\mathrm{L}-x')^2 - q(\mathrm{L}-x').$$

On a

$$q = \frac{3p\mathrm{L}}{8} + \frac{\mathrm{P}l^2}{2\mathrm{L}^3}(3\mathrm{L}-l).$$

Suivant que P ou $p$ sera nul, la valeur de $q$ se réduira respectivement au premier ou au deuxième terme du second membre de cette équation ; ainsi, supposant $\mathrm{P}=0$, on a

$$q = \frac{3p\mathrm{L}}{8},$$

et la formule $(a)$ devient

$$\frac{\mathrm{RI}}{n} = \frac{\mathrm{R}bh^2}{6} = \frac{p}{2}(\mathrm{L}-x)^2 - \frac{3p\mathrm{L}}{8}(\mathrm{L}-x) = \frac{p}{2}(\mathrm{L}-x)\left(\frac{\mathrm{L}}{4}-x\right). \qquad (b)$$

Ce qui fait voir que pour les points qui donnent $x=\mathrm{L}$ et $x=\frac{\mathrm{L}}{4}$, le moment de rupture est nul ; ainsi, pour le point qui repose sur l'appui et pour celui situé à la distance $x=\frac{\mathrm{L}}{4}$ du point d'encastrement, la charge $p$ pourrait être infinie ; ce dernier point est celui d'inflexion de la pièce : c'est le point analogue au point M (fig. 56, n° 229).

Le point de plus grande flexion, c'est-à-dire le point où la flèche est la plus grande, est à une distance $x = \frac{5}{8}\,\mathrm{L}$ du point d'encastrement. Cette valeur de $x$, substituée dans la formule $(b)$, donne

$$\frac{\mathrm{RI}}{n} = \frac{\mathrm{R}bh^2}{6} = \frac{9}{128}\,p\mathrm{L}^2.$$

La formule $(b)$ fait voir aussi que le moment de résistance est d'autant plus grand que $x$ est plus petit, et que pour $x = 0$, c'est-à-dire pour le point d'encastrement, on a

$$\frac{\mathrm{RI}}{n} = \frac{\mathrm{R}bh^2}{6} = \frac{p\mathrm{L}^2}{8} = \frac{16}{128}\,p\mathrm{L}^2,$$

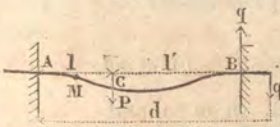
Cette valeur de $\frac{\mathrm{RI}}{n}$, comparée à la précédente, fait voir qu'une pièce prismatique fatigue plus au point d'encastrement qu'au point même de plus grande flèche.

Cette plus grande flèche est donnée par la formule

$$\mathrm{EI}f = 0{,}006\,7p\mathrm{L}^4, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{0{,}006\,7p\mathrm{L}^4}{\mathrm{EI}}.$$

**229.** *Pièce prismatique encastrée par ses deux extrémités.* Soit, *fig.* 56 :

Fig. 56.




P un poids placé en un point quelconque C de la pièce ;

$p$ une charge par mètre répartie uniformément sur toute la longueur de la pièce ;

$\mathrm{L} = l + l'$ la longueur de la pièce entre les encastrements ;

$l$ et $l'$ les distances respectives du point C aux points d'encastrement A et B ;

$q$ et $q'$ les forces verticales capables de produire le même effet que l'encastrement ; c'est-à-dire de maintenir horizontal l'élément B de la pièce ;

$d$ la distance de l'encastrement A à l'extrémité opposée de la pièce ;

$x$ la distance horizontale d'un point quelconque de la partie AC au point A ;

$x'$ la distance horizontale d'un point quelconque de CB au point A.

On a, pour un point pris sur AC,

$$\frac{\mathrm{RI}}{n} = \mathrm{P}(l - x) + \frac{p}{2}(\mathrm{L} - x)^2 - q(\mathrm{L} - x) + q'(d - x). \qquad (a)$$

Si le point est pris sur CB, on a

$$\frac{\mathrm{RI}}{n} = \frac{p}{2}(\mathrm{L} - x')^2 - q(\mathrm{L} - x') + q'(d - x').$$

Pour une pièce rectangulaire en $x$, on a $\frac{RI}{n} = \frac{Rbh^2}{6}$ (220).

Lorsque $x = x' = l$, les deux valeurs précédentes du moment d'inertie deviennent égales; ce qui devait être, puisqu'alors $x$ et $x'$ se rapportent au même point C de la pièce.

On a

$$\frac{qL^2}{2} - q'L\left(d - \frac{L}{2}\right) = \frac{pL^3}{6} + \frac{Pl^2}{2}, \qquad (b)$$

et

$$\frac{qL^3}{3} + \frac{q'L^2}{2}\left(d - \frac{L}{3}\right) = \frac{pL^4}{8} + \frac{Pl^2}{2}\left(L - \frac{l}{3}\right). \qquad (c)$$

Ces deux équations serviront à déterminer $q$ et $q'$; ainsi, de la première, on tirera la valeur de $q$ en fonction de $q'$; on substituera cette valeur dans la deuxième, qui donnera la valeur numérique de $q'$, et cette valeur numérique étant substituée dans la première équation, qui ne renfermera plus que l'inconnue $q$, on pourra tirer la valeur de cette inconnue (*Int.*, 456).

Dans le cas où $p$ est nul, la formule $(a)$ devient

$$\frac{RI}{n} = Pl - qL + q'd - (P - q + q')x.$$

Cette équation du premier degré en $x$ fait voir que le point de plus grande fatigue de la pièce est celui pour lequel $x$ a la plus grande valeur $l$ ou la plus petite 0; c'est donc C ou A, points pour lesquels les valeurs respectives S et S' de $\frac{RI}{n}$ deviennent

$$S = q'd - qL + (q - q')l \quad \text{et} \quad S' = Pl - qL + q'd.$$

Faisant $p = 0$ dans les équations $(b)$ et $(c)$, on en conclut

$$q = \frac{Pl^2(3Ld - 2L^2 + lL - 2ld)}{L^3(d - L)} \quad \text{et} \quad q' = \frac{Pl^2(L - l)}{L^2(d - L)}.$$

Les moments S et S' deviennent, en remplaçant $q$ et $q'$ par ces valeurs,

$$S = -\frac{2Pl^2(L - l)^2}{L^3} \quad \text{et} \quad S' = \frac{Pl(L - l)^2}{L^2}.$$

Faisant les calculs, on verra quelle sera la plus grande de ces valeurs, et ce sera pour elle qu'il faudra prendre les dimensions de la pièce. Pour avoir les moments de la partie CB, il suffit de remplacer $l$ par $l'$ dans les équations précédentes.

*Si le poids* P *est placé au milieu de la longueur de la pièce*, c'est-à-dire si $l = \frac{L}{2}$, on a

$$S = S' = \frac{RI}{n} = \frac{PL}{8};$$

ce qui fait voir que la charge que peut supporter la pièce est double de celle qu'elle supporte quand elle repose simplement sur deux appuis (224).

La flèche est donnée par la formule

$$EIf = \frac{PL^3}{192}, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{PL^3}{192EI}. \qquad (220)$$

Ce qui fait voir que la flèche est quatre fois plus petite que quand la pièce repose simplement sur deux appuis (224).

Pour le point d'inflexion M, on a $x = \frac{L}{4}$.

*Si* $P = 0$, *et que la pièce soit uniformément chargée d'un poids* p *par mètre de longueur*, des deux équations $(b)$ et $(c)$ on conclut

$$q = \frac{1}{12}\frac{pL}{d - L}(6d - 5L), \quad \text{et} \quad q' = \frac{1}{12}\frac{pL^2}{d - L}.$$

Ces valeurs, substituées dans la formule $(a)$, où on suppose également $P = 0$, donnent

$$\frac{RI}{n} = \frac{1}{12}p(L^2 - 6Lx + 6x^2) = \frac{p}{2}\left[\left(\frac{L}{2} - x\right)^2 - \frac{L^2}{12}\right].$$

Ce qui fait voir que la valeur maxima du moment de résistance correspond à $x = 0$, c'est-à-dire au point A, pour lequel on a par conséquent

$$\frac{RI}{n} = \frac{pL^2}{12}.$$

On voit aussi que ce moment diminue à mesure que $x$ augmente, et qu'il est égal à 0 quand

$$\left(\frac{L}{2} - x\right)^2 = \frac{L^2}{12}, \text{ c'est-à-dire quand } x = 0{,}212L.$$

A partir de $x = 0{,}212L$, le moment de résistance devient négatif et sa valeur absolue croît jusqu'au milieu de la pièce, pour lequel $x = \frac{L}{2}$, et par suite

$$\frac{RI}{n} = \frac{pL^2}{24}.$$

Tout étant symétrique par rapport au milieu de la pièce, au delà de ce point, le moment de rupture repasse par les mêmes valeurs.

La flèche est donnée par la formule

$$EIf = \frac{1}{48} \times \frac{1}{8} pL^3, \quad \text{d'où} \quad f = \frac{pL^3}{384EI}.$$

Ainsi, la flèche n'est que le 1/5 de celle qui a lieu, pour le même poids, quand la pièce repose librement sur deux appuis (225).

Dans les constructions, les poutres n'étant en général prises dans les murs que de $0^m,30$ à $0^m,50$ au plus, cela ne suffit pas pour produire un encastrement complet, et il est prudent de supposer que les pièces reposent sur deux appuis (224).

**230** *Remarques.* 1re. Dans les limites de charge où l'élasticité n'est pas altérée, et qui sont celles que supposent les formules précédentes, qu'il convient d'adopter dans la pratique, la fonte et le fer résistant également à l'extension et à la compression (216 et 218), il en résulte que pour les poutres à simple T, il est indifférent de placer la nervure horizontale en dessus ou en dessous. Pour la rupture, la nervure se place en dessus ou en dessous, suivant que la résistance de la matière à la rupture est plus grande ou plus petite pour l'extension que pour la compression (page 276).

Par les mêmes raisons, dans les poutres à double T, les nervures doivent être les mêmes dans les limites de la pratique. Cependant, eu égard à ce que la fonte résiste bien mieux à la rupture par compression que par traction, les ingénieurs anglais, dans les poutres de pont, donnent à la nervure inférieure une étendue beaucoup plus grande qu'à la nervure supérieure.

2e. Il est prudent de ne faire travailler les poutres en fonte soumises à des vibrations, comme celles des ponts de chemin de fer, qu'au 1/5 et même au 1/6 de la charge de rupture. Pour les ponts ordinaires, on va jusqu'au 1/4. La résistance moyenne de la fonte à la rupture par flexion étant 32 441 000 kil., on fera dans les formules précédentes R égal au 1/5, ou au 1/6, ou au 1/4 de ce nombre, selon les cas. Des ingénieurs font souvent $R = 7\,500\,000$ pour les pièces ordinaires de machines, $R = 3\,000\,000$ pour les arbres de roues hydrauliques et les poutres de ponts ordinaires, et $R = 2\,000\,000$ et quelquefois moins pour les ponts de chemin de fer (220).

Des expériences faites par M. Baumgarten sur des poutres en fonte d'une certaine dimension, et non sur de petits échantillons, ont conduit à des valeurs moindres pour la charge de rupture R et pour le coefficient d'élasticité E ; on a obtenu en moyenne $R = 27\,400\,000$ et $E = 9\,595\,000\,000$. Ces nombres vérifient ceux obtenus avant sur le viaduc de Tarascon et consignés dans un rapport de MM. Collet-Meygret et Desplaces.

3e. On admet que la flexion des poutres en fonte ne doit pas dépasser 1/600 de la portée, et qu'il conviendrait de la limiter à 1/2000.

4e. Les ingénieurs anglais pensent que la charge d'un pont varie de

5000 à 6655 kilog. par mètre de longueur de paire de rails. La charge d'épreuve excède rarement le 1/3 de celle de rupture, et on préfère souvent n'aller qu'à la charge réelle maximum, en observant les flexions.

5e. Des expériences de M. Fairbairn, il résulte que les flexions sont encore proportionnelles aux charges pour les poutres en fer à double T, et que le coefficient d'élasticité est $E = 11\,502\,000\,000$.

Des expériences récentes faites au Conservatoire des arts et métiers sur des poutres en chêne, en sapin, en fer à double T et à semelles égales, en fonte à double T et à semelles égales, et en fonte à double T et à semelles inégales, ont également donné des flexions sensiblement proportionnelles aux charges.

6e. Des expériences de M. Fairbairn sur des tubes en tôle ont donné $E = 16\,600\,000\,000$ jusqu'à une flexion de 1/378 de la portée. Le premier grand tube en tôle du pont de Conway a donné $E = 13\,185\,000\,000$. Les ingénieurs anglais admettent que la résistance de la tôle à la rupture est, par mètre carré, $28\,680\,000^k$ pour la traction, et $23\,290\,000^k$ pour la compression, nombres qui sont sensiblement dans le rapport de 5 à 4. Dans la pratique, on peut supposer ces deux résistances égales et faire $R = 6\,000\,000$ kil.

**251.** *Formules pratiques relatives aux tourillons.* Des expériences de Buchanan, il résulte que le diamètre d'un tourillon en fonte est, pour résister à la flexion, donné par la formule

$$d = k\sqrt[3]{P},$$

et celui des tourillons en fer par celle

$$d = k\sqrt[3]{\frac{9}{14}}\,P = 0{,}863k\sqrt[3]{P}.$$

$d$ diamètre du tourillon, en centimètres ;

$k$ coefficient variable de 0.87 à 0,95 d'après les observations de Buchanan, et de 0.71 à 0.85 d'après celles de Tredgold. On pourra considérer la valeur maxima de Buchanan comme convenable aux tourillons soumis à des réactions brusques, comme ceux des arbres à cames; on pourra la réduire à 0.85 pour les roues hydrauliques. Dans les machines à vapeur, on peut faire, d'après Robertson, $k = 0.69$, en augmentant de 1/8 pour l'usé, et encore cette règle donne des diamètres trop forts pour les machines d'une puissance supérieure à 20 chevaux.

P charge du tourillon ou pression qu'il exerce sur son coussinet, exprimée en kilogrammes.

Ces deux formules font voir que la résistance à la flexion d'un tourillon en fonte est à celle d'un tourillon en fer de même diamètre dans le rapport de 9 à 14; ainsi, faisant $k = 0{,}80$ pour la fonte, le diamètre d'un tourillon en fer placé dans les mêmes conditions sera donné par la formule

$$d = 0{,}80 \times 0{,}863 \sqrt[3]{\mathrm{P}} = 0{,}69 \sqrt[3]{\mathrm{P}}.$$

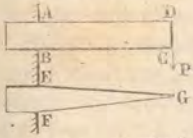
La longueur convenable des tourillons est, d'après Tredgold, égale à 1,2 fois le diamètre; ce sont en effet les proportions généralement adoptées dans la pratique, à l'exception des tourillons en fer dont le diamètre est inférieur à $0^m,07$, pour lesquels la longueur se prend le plus souvent égale 1,5 fois le diamètre.

**232.** *Solides d'égale résistance.* Quand une pièce est encastrée par une extrémité et chargée à l'autre d'un poids P, le moment de cette force P, pour rompre la pièce en un point quelconque, est d'autant plus petit que ce point est plus éloigné de l'encastrement; de là il résulte que pour ne pas employer de matière inutile, les sections transversales de la pièce doivent aller en diminuant depuis l'encastrement jusqu'au point d'application du poids, point où la section devient nulle.

La formule $\mathrm{PL} = \frac{\mathrm{R}bh^2}{6}$, donnée pour une pièce rectangulaire (220), est applicable à un point quelconque de la longueur de la pièce; alors, supposant que la hauteur $h$ reste constante, et résolvant l'équation par rapport à $b$, on aura, pour une valeur quelconque $l$ de L,

$$b = \frac{6\mathrm{P}}{\mathrm{R}h^2} l.$$

Fig. 57.

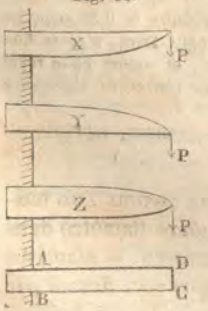



Ce qui fait voir que la largeur du solide sera proportionnelle à $l$; ainsi, le solide étant représenté en élévation par le rectangle ABCD (*fig.* 57), dont la dimension $\mathrm{AB} = h$, il le sera en plan par le triangle EFG.

Supposant au contraire que la largeur $b$ reste constante, et résolvant l'équation par rapport à $h$, on aura, pour une valeur quelconque $l$ de L,

$$h^2 = \frac{6\mathrm{P}}{\mathrm{R}b} l,$$

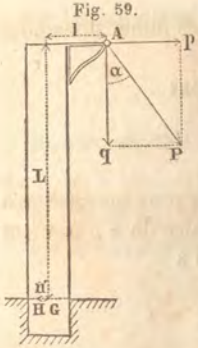
Fig. 58.




c'est-à-dire que le carré de la hauteur $h$ sera proportionnel à $l$, et la pièce qui est représentée en plan par le rectangle ABCD (*fig.* 58), dont la dimension $\mathrm{AB} = b$, le sera en élévation par l'une quelconque des trois formes paraboliques X, Y, Z, dont le sommet est au point d'application de la force P (*Int.*, 1110).

On peut, en opérant d'une manière analogue, déterminer la forme des solides d'égale résistance, pour toutes les manières dont peuvent reposer les solides et quelle que soit la manière dont ils sont chargés.

Fig. 59.




**233.** *Pièce soumise à une force* P *appliquée en un point quelconque* A *de la pièce, et faisant avec la direction de cette pièce un angle* $\alpha$. La force P se décompose en deux, l'un $P\sin\alpha = p$ normale à la direction de la pièce, et l'autre $P\cos\alpha = q$ dirigée suivant la direction de la pièce.

La direction de la force $q$ ne passant pas au centre de gravité G de la section de rupture, la ligne des fibres invariables se trouvera au point H différent de G, et en appelant :

$n$ la distance du point le plus éloigné de la section de rupture de la pièce à la ligne des fibres invariables, quand la pièce est seulement sollicitée par la force $p$; cette ligne passe alors par le point G (220);
$n'$ la distance HG;
S la section de la pièce;
R le plus grand effort auquel peut être soumise la matière qui compose la pièce (220);
I le moment d'inertie de la section transversale de la pièce (220);
L la longueur de la pièce ou le bras de levier de la force $p$;
$l$ le bras de levier de la force $q$;
E le coefficient d'élasticité (220);
$f$ la flèche produite;

on a

$$n' = \frac{qI}{(pL + ql)S}.$$

On a aussi

$$\frac{R}{n + n'} I = pL + ql;$$

d'où on conclut, en remplaçant $n'$ par sa valeur précédente,

$$\frac{RI}{n} = pL + ql + \frac{qI}{nS}.$$

Si la section de la pièce est rectangulaire, on a (220)

$$n = \frac{h}{2} \quad \text{et} \quad I = \frac{bh^3}{12},$$

et, par suite, en remarquant que $S = bh$,

$$\frac{RI}{n} = \frac{Rbh^2}{6} = pL + ql + \frac{qh}{6}.$$

Formule à l'aide de laquelle on déterminera la charge que pourra sup-

porter une pièce de dimensions déterminées, ou ces dimensions pour supporter une charge donnée.

Dans le cas où $q = 0$, la formule précédente devient

$$\frac{RI}{n} = \frac{Rbh^2}{6} = pL;$$

ce que l'on devait trouver, puisqu'alors la pièce n'est plus soumise qu'à un effort $p$ normal à sa longueur (220). Si au contraire on a $p = 0$, et que la pièce soit seulement chargée d'un poids $q$, on a

$$\frac{RI}{n} = \frac{Rbh^2}{6} = q\left(l + \frac{h}{6}\right).$$

Dans les formules précédentes, on a négligé la flèche produite; ce que l'on peut faire dans la pratique, quoiqu'il fallût, pour plus d'exactitude, l'ajouter à $l$.

On a, en négligeant $f$ par rapport à $l$,

$$f = \frac{L^2}{EI}\left(\frac{pL}{3} + \frac{ql}{2}\right) = \frac{12L^2}{Ebh^3}\left(\frac{pL}{3} + \frac{ql}{2}\right).$$

Si $q = 0$, on a

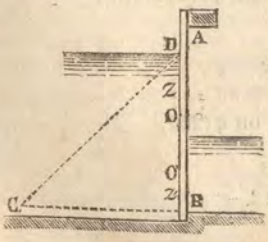
$$f = \frac{pL^3}{3EI} = \frac{4pL^3}{Ebh^3} \qquad \text{(comme au n° 220).}$$

Si, au contraire, $p = 0$, on a

$$f = \frac{qlL^2}{2EI} = \frac{6qlL^2}{Ebh^3}.$$

**234.** *Aiguille verticale supportant une charge de liquide* (*fig.* 60). Appelant :

Fig. 60.




$a$ l'étendue horizontale de liquide dont la pression se reporte contre l'aiguille;
L la distance AB des appuis de l'aiguille;
H la profondeur de l'eau en amont, au-dessus du point B;
H' la profondeur de l'eau en aval;
$q$ et $q'$ les pressions de l'aiguille sur les points A et B;
$\omega$ la densité du liquide ou le poids du cube de liquide dont le côté a servi à exprimer les longueurs $a$, L, H, H'.

La pression du liquide sur la face d'amont de l'aiguille est représentée par la surface du triangle rectangle isocèle BCD multipliée par $a$ et par la densité du liquide; ainsi elle est

$$\omega \times a \times \frac{H^2}{2}.$$

Sur la face d'aval de l'aiguille, la pression de l'eau est

$$\omega \times a \times \frac{H'^2}{2}.$$

Les centres de pression sont situés à des hauteurs $\frac{H}{3}$ et $\frac{H'}{3}$ au-dessus du point B (*Int.*, 1573).

La somme des pressions de l'aiguille contre ses appuis est la différence des expressions précédentes, c'est-à-dire

$$\frac{\omega a}{2}(H^2 - H'^2).$$

Prenant par rapport au point fixe B les moments des forces qui sollicitent l'aiguille, puisqu'il y a équilibre, on doit avoir

$$qL = \omega a \left(\frac{H^2}{2} \times \frac{H}{3} - \frac{H'^2}{2} \times \frac{H'}{3}\right), \quad \text{d'où} \quad q = \frac{\omega a}{6L}(H^3 - H'^3).$$

On a alors

$$q' = \frac{\omega a}{2}(H^2 - H'^2) - \frac{\omega a}{6L}(H^3 - H'^3).$$

Pour un point O situé au-dessus du niveau d'aval et à la profondeur $z$ au-dessous du niveau d'amont, on a (220)

$$\frac{RI}{n} = q[L - (H - z)] - \frac{\omega a z^3}{6}. \qquad (a)$$

Le point de plus grande courbure de l'aiguille, au-dessus du niveau d'aval, correspond à

$$z = \sqrt{\frac{2q}{\omega a}} = \sqrt{\frac{H^3 - H'^3}{3L}}.$$

Remplaçant $z$ par cette valeur et $q$ par la sienne dans l'équation $(a)$, on a pour le point de plus grande fatigue de la partie considérée, en réduisant,

$$\frac{RI}{n} = \frac{\omega a}{6L}(H^3 - H'^3)\left(L - H + \frac{2}{3}\sqrt{\frac{H^3 - H'^3}{3L}}\right). \qquad (c)$$

Pour un point O' situé au-dessous du niveau d'aval à la hauteur $z'$ au-dessus du point B, on a, en remarquant que $H - H'$ est la hauteur constante de pression sur tous les points situés au-dessous de ce niveau,

$$\frac{RI}{n} = q'z' - (H - H')\frac{\omega a z'^2}{2}. \qquad (b)$$

Le point de plus grande fatigue de l'aiguille, au-dessous du niveau d'aval, correspond à

$$z' = \frac{q'}{\omega a(H - H')} = \frac{H + H'}{2} - \frac{H^3 - H'^3}{6L(H - H')}.$$

Remplaçant $z'$ par cette valeur et $q'$ par la sienne dans l'équation $(b)$, il vient pour le point de plus grande fatigue, en réduisant,

$$\frac{RI}{n} = \frac{\omega a}{2}(H - H')\left(\frac{H + H'}{2} - \frac{H^3 - H'^3}{6L(H - H')}\right)^2. \qquad (d)$$

Le moment de résistance $\frac{RI}{n}$ ou $\frac{Rbh^2}{6}$, si l'aiguille est un prisme à section rectangulaire (220), devra donc être au moins égal à la plus grande des valeurs $(c)$ et $(d)$.

**235.** Effort tendant à faire rompre par glissement longitudinal une pièce soumise à un effort de flexion. (Extrait d'une note insérée dans les *Annales des ponts et chaussées*, année 1856, sur un *Traité des ponts, système How*, par M. Jouravski, ingénieur russe).

Pour une pièce à section rectangulaire encastrée par une extrémité et sollicitée à l'autre par une force P, lorsqu'il y a équilibre, une section située à la distance $l$ de l'encastrement donne pour somme des moments, par rapport à la ligne neutre, des résistances à l'extension et à la compression de toutes les fibres qui composent la section

$$\frac{rbh^2}{6} = P(L - l). \qquad (1)$$

$r$ effort auquel résistent les fibres les plus éloignées de la ligne des fibres invariables, par unité de section ; la valeur limite de $r$ est R (220).

Les résistances à l'extension des fibres vont en augmentant depuis la ligne neutre, où on peut les supposer nulles, jusqu'aux points les plus éloignés de cette ligne, points où les fibres subissent le plus grand allongement. La résultante de toutes ces résistances est égale à leur somme, et elle a pour expression

$$\frac{rbh}{4}.$$

Les fibres qui résistent à la compression fournissent une résultante égale à la précédente, et comme elle agit en sens contraire de la première, et il en résulte que ces deux résultantes tendent à rompre le solide par glissement suivant le plan longitudinal contenant la ligne des fibres invariables. Appelant Q la force qui tend à rompre l'adhésion latérale des fibres situées près de la ligne des fibres invariables, on a donc

$$Q = \frac{rbh}{4},$$

ou, en remplaçant $r$ par sa valeur tirée de l'équation (1),

$$Q = \frac{3P(L - l)}{2h}. \qquad (2)$$

La valeur de Q est proportionnelle à $L - l$, et elle est maximum quand $l = 0$, c'est-à-dire pour le point d'encastrement, qui donne

$$Q = \frac{3PL}{2h}.$$

Suivant un plan longitudinal situé à la distance $y$ des fibres invariables, la valeur de Q est

$$Q' = \frac{2br}{h}\left(\frac{h^2}{8} - \frac{y^2}{2}\right). \qquad (a)$$

Q' augmente à mesure que $y$ diminue, et il est maximum pour $y = 0$, c'est-à-dire pour le plan longitudinal passant par la ligne des fibres invariables. Faisant $y = 0$ dans la valeur de Q', on obtient, comme cela devait être,

$$Q' = Q = \frac{rbh}{4}. \qquad (a')$$

Les équations (1) et (2) deviennent pour le point d'écartement, en faisant $r = R$, résistance à laquelle on peut soumettre les fibres,

$$P = \frac{Rbh^2}{6L}. \qquad (3)$$

$$Q = \frac{3PL}{2h} = \frac{Rbh}{4}. \qquad (4)$$

La formule (3) servira à vérifier si la pièce résistera convenablement suivant l'encastrement, et la formule (4), si la pièce ne se divisera pas longitudinalement. $R_1$ étant la résistance de sécurité de la pièce au glissement parallèlement à la longueur des fibres, Q ne devra pas dépasser

$$R_1 \times bL.$$

Supposant que deux solides prismatiques de même longueur L, largeur $b$ et hauteur $h$, soient mis l'un sur l'autre et encastrés à une extrémité, et que leur ensemble soit chargé à l'autre extrémité d'un poids P, on aura

$$P = 2\,\frac{Rbh^2}{6L}.$$

Mais si les deux solides sont unis de manière à ne former qu'une pièce, on aura

$$P' = \frac{Rb(2h)^2}{6L} = 2P.$$

Ce qui montre qu'en empêchant les deux pièces de glisser l'une sur l'autre, on double la charge qu'elles peuvent supporter.

Dans le pratique, on s'oppose au glissement au moyen de clefs. Les formules $(a)$ ou $(a')$ serviront à déterminer le nombre et les dimensions de ces clefs, selon la position du joint par rapport au milieu de la hauteur de la pièce. Ces formules montrent de plus que Q' est proportionnel à $r$; or comme $r$ est proportionnel, pour un même poids P, à $L - l$ (formule 1), on voit que les clefs devront être également espacées entre elles sur toute la longueur de la pièce. Il est évident que l'on devra calculer le nombre des clefs pour la plus grande valeur de Q', c'est-à-dire pour le point d'encastrement, ou en faisant $r = R$ dans les équations $(a)$ et $(a')$. Les clefs doivent avoir une largeur telle, qu'elles ne soient pas cisaillées transversalement par les deux parties de la poutre, et leur hauteur doit donner des entailles capables de résister ensemble à la compression Q sans altération.

Les clefs, sous l'action des deux parties de la poutre, tendent à tourner autour de leur axe; il en résulte qu'elles ne pressent pas uniformément contre les entailles, et que pour cette raison, on doit augmenter un peu la profondeur de ces entailles. De plus, cette tendance des clefs à tourner écarteraient les pièces qui forment la poutre, si on ne les reliait entre elles par des brides en fer.

Si la poutre reposait sur deux appuis placés à ses extrémités, et qu'elle fût chargée du poids P en son milieu, on la considérerait comme étant encastrée au milieu de sa longueur, et chargée à chaque extrémité du poids $\frac{P}{2}$.

Si, dans ce dernier cas, le poids P était réparti uniformément sur toute la longueur de la poutre, $p$ étant la charge par mètre de longueur, on aurait $P = pL$, et pour l'équilibre d'une longueur $L - l$, comptée à partir d'une extrémité, la formule (1) deviendrait

$$\frac{rbh^2}{6} = \frac{pL}{2}\left(\frac{L}{2} - l\right) - \frac{p}{2}\left(\frac{L}{2} - l\right)^2.$$

La force Q, qui tend à opérer la disjonction de la poutre suivant l'étendue $L - l$, est $\frac{rbh}{4}$, et on a, en remplaçant $r$ par sa valeur tirée de l'équation précédente,

$$Q = \frac{3p}{4h}\left(\frac{L^2}{4} - l^2\right).$$

La valeur de Q augmentant à mesure que le carré de $l$ est plus petit, on voit que les clefs devront être plus rapprochées ou plus profondes vers les extrémités de la poutre qu'au milieu. De même, pour une poutre encastrée à une extrémité, et chargée uniformément sur toute sa longueur, les clefs doivent être de plus en plus rapprochées ou plus profondes à partir de l'encastrement.

Les considérations précédentes s'appliquent aux rivets des poutres en tôle, comme aux clefs des poutres en bois.

**236.** *Résistance à la torsion.* Lorsqu'une pièce prismatique homogène est soumise à un effort de torsion, tant qu'on n'a pas dépassé la limite d'élasticité, le rapport de cet effort à l'angle de torsion est à peu près constant pour une même matière. Désignant par G ce rapport, par Q l'effort, et par $\theta$ l'angle de torsion, pour une tige ayant l'unité de longueur et l'unité de section, on a $\frac{Q}{\theta} = G$, que l'on peut appeler coefficient de torsion.

Pour un solide cylindrique ou prismatique, on a

$$P\rho = \frac{Gt}{L} I, \quad \text{d'où} \quad t = \frac{P\rho \times L}{GI}. \qquad (a)$$

P force tendant à tordre le corps en agissant dans un plan normal à l'axe;
$\rho$ bras de levier de P, ou longueur de la perpendiculaire commune à la direction de P et à l'axe du corps;
$P\rho$ moment de la force P;
$t$ angle de torsion, ou longueur de l'arc décrit par un point situé à l'unité de distance de l'axe du corps, ou encore longueur de l'arc décrit par un point quelconque du corps, divisée par la distance de ce point à l'axe;
L longueur de la pièce;
$I = n^2 d\omega$ somme des produits de la surface $d\omega$ de la section de chacune des fibres élémentaires qui composent la pièce par le carré de la distance $n$ de cette fibre à l'axe. I a été appelé *moment d'inertie polaire* par M. Persy.

Pour une section circulaire. . . . . $I = \frac{\pi r^4}{2}$.

Pour une section en couronne circulaire. . $I = \frac{\pi(r^4 - r'^4)}{2}$.

Pour une section rectangulaire. . . . . $I = \frac{b^3 h^3}{3(b^2 + h^2)}$.

Pour une section carrée, $q = b = h$ et $I = \frac{q^4}{6}$.

$r$ rayon du cylindre plein;
$r$ et $r'$ rayons extérieur et intérieur du cylindre creux;
$b$ et $h$ côtés de la section de la pièce prismatique;
$q$ côté de la pièce à section carrée.

Des expériences de M. Duleau, de M. Favard et de la société indus-

trielle de Mulhouse, et de plusieurs observations, M. Morin conclut le tableau suivant des valeurs de G :

| | |
|---|---|
| Fer doux | 6 000 000 000 |
| Fer en barres | 6 666 000 000 |
| Acier d'Allemagne | 6 000 000 000 |
| Acier fondu, très-fin | 10 000 000 000 |
| Fonte | 2 000 000 000 |
| Cuivre | 4 366 000 000 |
| Bronze | 1 066 000 000 |
| Chêne | 400 000 000 |
| Sapin | 433 000 000 |

Dans la pratique, il convient de limiter assez l'angle de torsion pour qu'il ne nuise pas à la transmission de mouvement et que l'élasticité de la fibre la plus éloignée de l'axe ne soit pas altérée. Or cette fibre formant une hélice dont la tangente fait avec la position primitive de la fibre un angle dont la tangente trigonométrique est $\frac{n't}{L}$, c'est cette tangente qu'il suffit de limiter.

$n'$ distance de l'axe à la fibre qui en est la plus éloignée.

Des expériences et observations citées ci-dessus, il résulte que l'on peut faire pour les arbres allégés

$$\frac{n't}{L} = 0{,}000\,667.$$

Tangente qui correspond à un angle de 2′ 18″ formé par les deux positions de la fibre.

Pour les arbres forts ou premiers moteurs, on fait

$$\frac{n't}{L} = \frac{0{,}000\,667}{2} = 0{,}000\,333.$$

On a donc en moyenne

$$\frac{n't}{L} = 0{,}0005, \quad \text{d'où} \quad t = 0{,}0005\,\frac{L}{n'}.$$

Comme pour les arbres cylindriques pleins, cylindriques creux, à section rectangulaire et à section carrée, on a respectivement

$$n' = r, \quad n' = r, \quad n' = \frac{1}{2}\sqrt{b^2 + h^2}, \quad n' = \frac{q}{\sqrt{2}}.$$

On a donc pour ces sections respectives :

$$t = 0{,}0005\,\frac{L}{r} \quad t = 0{,}0005\,\frac{L}{r} \quad t = 0{,}0005\,\frac{2L}{\sqrt{b^2 + h^2}} \quad t = 0{,}0005\,\frac{L\sqrt{2}}{q}.$$

Remplaçant dans la première des formules (*a*) $t$ et I par leurs valeurs, on a pour les sections précédentes les formules pratiques

$$P\rho = 0{,}000\,5G\,\frac{\pi r^3}{2} \qquad P\rho = 0{,}000\,5G\,\frac{\pi(r^4 - r'^4)}{2r}$$

$$P\rho = 0{,}000\,5G\,\frac{bh(b^2+h^2)}{6\sqrt{b^2+h^2}} \qquad P\rho = 0{,}000\,5G\,\frac{q^3}{3\sqrt{2}}.$$

Ces dernières formules servent à calculer quelles doivent être les dimensions de la section transversale de l'arbre pour résister à un moment donné $P\rho$, et elles font voir que ce moment est indépendant de la longueur L de la pièce, ce qui est évidemment vrai jusqu'au moment de rupture. Les expressions de $t$ font voir au contraire que l'angle de torsion est proportionnel à L et au moment $P\rho$.

Des expériences de M. Carillon sur des fontes de Paris et de différentes localités françaises, il résulte que la valeur 0,000 667 de $\frac{n't}{L}$ n'est que le 1/16 environ de celle qui correspond à la rupture; ce qui indique que la formule pratique conduit à des dimensions que l'on peut considérer comme supérieures à celles nécessaires.

*Formule pratique.* On peut encore se servir, pour déterminer le diamètre à donner aux pièces cylindriques soumises à un effort de torsion, de la formule

$$d^3 = k\,\frac{A}{n}.$$

$k$ coefficient dont la valeur dépend de la nature de la pièce;
$d$ diamètre de la pièce en centimètres;
A quantité d'action transmise par la pièce en une minute, exprimée en kilogrammètres;
$n$ nombre de tours que fait la pièce en une minute.

Pour un arbre creux, la quantité d'action A qu'il peut transmettre est égale à celle que pourrait transmettre l'arbre s'il était plein, moins celle que pourrait transmettre un arbre plein d'un diamètre égal au diamètre intérieur de l'arbre creux; d'où il résulte qu'en appelant $d$ le diamètre extérieur de l'arbre creux, et $d'$ son diamètre intérieur, on a

$$d^3 - d'^3 = k\,\frac{A}{n}.$$

D'après Buchanan, $k = 2.3$ pour les arbres ou tourillons en fonte, et $k = \frac{9}{14} \times 2.3 = 1.48$ pour les arbres ou tourillons en fer. Mais, à mesure que les moyens de fabrication se sont perfectionnés, les dimensions des différentes pièces de machines ont dû diminuer, et, d'après les observations de M. Walter, sur 21 machines plus récentes, et dont les

arbres ou tourillons en fonte transmettent des effets variant de 5 à 50 chevaux, avec des vitesses de rotation très-variables, mais sans choc, il résulte que pour la fonte $k$ varie de 1.10 au minimum à 1.86 au maximum, et que la valeur moyenne de $k$ est sensiblement 1.6. La valeur 1.10 a été trouvée pour des arbres en bonne fonte anglaise faisant marcher des moulins à blé; mais il convient de ne pas faire $k$ plus petit que 1.25. Quand le travail transmis est irrégulier, mais sans choc ou avec des chocs très-faibles, on pourra considérer la valeur 1.86 de $k$ comme donnant toute la sécurité désirable.

A l'usine de Terre-Noire, pour le tourillon en fonte d'une machine de 35 chevaux commandant un marteau frontal, $k = 5{,}085$; l'arbre fait 20 tours par minute, et il fonctionne depuis 1823.

Au Creuzot, pour une machine analogue, $k = 7.66$.

En admettant le rapport de la résistance du fer à celle de la fonte de Buchanan, la valeur moyenne de $k$ pour la fonte étant 1,6, pour le fer on aura $k = \frac{9}{14} \times 1{,}6 = 1{,}03$; mais, quoique cette valeur soit encore quelquefois dépassée dans la pratique, il convient de la considérer comme une valeur maxima qui ne doit être employée que pour le fer de médiocre qualité et non corroyé; c'est ce qui résulte du tableau suivant, dû aux observations de M. Walter.

| DÉSIGNATION DES MACHINES. | FORCE transmise par chaque tourillon. | NOMBRE de tours par minute. | DIAMÈTRE des tourillons. | VALEUR de $k$. |
|---|---|---|---|---|
| | chevaux. | | m. | |
| Machine du bateau *le Sphinx*. . . . . | 30 | 25 | 0.16 | 0.758 |
| *Id.* *le Montereau*. . . . | 10 | 30 | 0.1125 | 0.944 |
| *Id.* *la Ville de Corbeil*.. | 10 | 30 | 0.11 | 0.887 |
| *Id.* *la Ville de Nantes*.. | 12 | 50 | 0.105 | 1.070 |
| Roue hydraul. marchant depuis 1833.. . | 4 | 10 | 0.09 | 0.405 |
| Roue hydraulique commandant une machine à couper le chiffon. . . . . | 6 | 8 | 0.135 | 0.729 |
| Roue hydraulique de Guérigny.. . . . . | 30 | 9 | 0.22 | 0.709 |

La roue hydraulique qui donne $k = 0{,}405$ commande une machine à papier, et produit par conséquent un travail régulier. Les autres valeurs de $k$ correspondent à des travaux irréguliers, et en partie par chocs; ainsi la roue de Guérigny, commandant des laminoirs, agit par chocs, atténués il est vrai par un volant, et pour les bateaux, les réactions quelquefois très-violentes de l'eau se reportent directement sur les tourillons. On peut donc, suivant que le travail transmis par l'arbre a plus ou moins d'analogie avec celui des machines du tableau, considérer les valeurs 0,405, 0,709 et 0,758 de $k$ comme suffisantes.

Lorsqu'un arbre n'est soumis qu'à un effort de torsion, il suffit que son diamètre soit égal à celui du tourillon; mais dans la pratique il convient de le prendre de 1/10 à 1/8 plus grand.

Pour le bois, M. Faure rapporte :

1° Que des arbres à 8 pans, de roues hydrauliques, transmettant un effort régulier sans choc, et marchant depuis longtemps sans éprouver de torsion sensible, lui ont donné pour $k$ les valeurs 17, 19 et 25, dont la moyenne est 20 environ.

2° Que des arbres de transmission de mouvement à des laminoirs, également à 8 pans, lui ont donné $k = 50$ en moyenne, et même l'un de ces arbres, se tordant un peu il est vrai lors de l'engagement des barres de fer, mais n'en résistant pas moins, a donné $k = 42$.

3° Que des arbres ronds de $0^m,80$ à $0^m,83$ de diamètre, formés de 4 pièces de bois, bien cerclés en fer et entourés de bagues en fonte, mais commandant des marteaux, et étant par conséquent soumis à des chocs violents, ont donné $k = 160$; valeur que l'on ne doit pas considérer comme trop grande, puisque l'on remarque encore une légère torsion. Un arbre de $0^m,71$ de diamètre, donnant $k = 95$, valeur minima trouvée, se tordait et se fendillait sous les efforts qu'il avait à supporter. La longueur des arbres de marteaux observés a varié de 6 à 8 mètres.

**237.** *Arbre soumis à la fois à un effort de flexion et de torsion.* Dans ce cas, on calcule le diamètre de l'arbre pour résister à chacun des efforts séparément (224 et 236), et on prend celle des deux valeurs trouvées qui est la plus grande. Si le plus grand diamètre est donné par l'effort de torsion, on prend le diamètre trouvé pour les tourillons, et on augmente de 1/10 à 1/8 celui de l'arbre.

**238.** *Dimensions des balanciers.* On peut considérer un balancier comme étant un solide reposant sur un appui placé au milieu de sa longueur et chargé à ses deux extrémités (221); on obtiendra donc ses dimensions, en négligeant les nervures, que l'on ne considère que comme une garantie de solidité, au moyen de la formule

$$\frac{PL}{2} = \frac{Rbh^2}{6}.$$

P force réelle qui sollicite chaque extrémité du balancier, en kilog.;
L distance des points d'application des deux forces P;
R = 7000000 pour la fonte (220, 230); mais il convient, dans ce cas de mouvement, de faire R égal au 1/6 de la résistance absolue, c'est-à-dire à 4670000;
$b$ épaisseur du balancier, en mètres;
$h$ hauteur du balancier au milieu de sa longueur, en mètres.

L'épaisseur $b$ de la toile ou *panneau*, non compris les nervures, est uniforme sur toute la longueur du balancier, et varie du 1/12 au 1/16 de la hauteur $h$; cependant, pour les bateaux, où on supprime les nervures, $b$ est quelquefois égal au 1/6 et même au 1/5 de $h$.

La longueur L est ordinairement égale à trois fois la course du piston.

On donne au balancier la forme parabolique (232 et *Int.*, 1124), et, afin de pouvoir fixer les petits arbres qu'il porte à ses extrémités, on le termine par des manchons dont le rayon extérieur est égal au rayon intérieur multiplié par 5/2; ces manchons sont raccordés avec les arcs de parabole par des tangentes communes droites ou courbes. Au lieu de faire passer les arcs de parabole par les centres des manchons, comme l'indique la théorie, on les fait quelquefois passer par les points extérieurs de ces manchons, c'est-à-dire par les points extrêmes du balancier. Souvent même on se contente de tracer des arcs de cercle tangents aux circonférences extérieures des deux manchons, et passant par les points extrêmes de la hauteur $h$.

La saillie des nervures varie des 2/3 de l'épaisseur $b$ du balancier à une fois cette épaisseur.

La longueur totale des moyeux recevant les différents axes fixés au balancier varie de 1.5 à 2 fois le diamètre de ces axes. Ce diamètre est égal à 1,2 fois celui des tourillons, et celui-ci se calcule par la formule du n° 222. La longueur du grand moyeu varie ordinairement entre les 2/5 et la 1/2 de $h$.

**239.** *Dimensions des manivelles* (86 et suivants). On peut considérer une manivelle comme étant un solide encastré par une de ses extrémités et sollicité à l'autre par une certaine force. On obtiendra donc ses dimensions, en négligeant les nervures, au moyen de la formule

$$PL = \frac{Rbh^2}{6}. \qquad (220)$$

P force agissant à l'extrémité de la manivelle;
L longueur de la manivelle;
R = 7000000 (220, 230), mais il convient, comme dans le numéro précédent, de faire R = 4670000 pour les manivelles en fonte;
$b$ épaisseur de la manivelle, en mètres;
$h$ hauteur de la manivelle au point d'encastrement, en mètres.

On donne à l'épaisseur $b$, qui est uniforme sur toute la longueur de la manivelle, de 1/6 à 1/5 de $h$; seulement on renforce $b$ par une nervure qui joint les extrémités des manchons que porte la manivelle.

On donne à la manivelle la forme parabolique (232 et *Int.*, 1124), et on raccorde les deux manchons aux arcs de parabole par des arcs de cercle tangents aux manchons et aux arcs de parabole. Le manchon qui reçoit l'arbre moteur a un rayon extérieur égal à 1,8 et jusqu'à 2,2 fois le rayon intérieur; le manchon qui reçoit le maneton a un rayon extérieur égal à 2 et jusqu'à 2,5 fois le rayon intérieur.

La longueur de ces manchons est ordinairement égale à 1,2 fois leur diamètre intérieur.

Le diamètre du maneton se calcule par la formule du n° 222, et celui de l'arbre moteur par celles du n° 236.

**240.** *Dents de roue d'engrenage* (82 et suivants). On peut considérer une dent d'engrenage comme étant un solide encastré par une de ses extrémités et sollicité à l'autre par un certain effort ; ses dimensions seront donc données par la formule

$$PL = \frac{Rbh^2}{6}. \qquad (220)$$

P pression que supporte la dent en kilogrammes ; on suppose P égal à la pression totale d'une roue d'engrenage sur l'autre, et appliqué à l'extrémité de la dent, comme étant le cas le plus favorable à la rupture ;

L longueur de la dent, c'est sa saillie sur la jante ;

$b$ largeur de la dent ;

$h$ hauteur ou épaisseur de la dent, suivant la circonférence de la roue ;

R = 7000000 (220, 230) ; mais les dents d'engrenage étant soumises à des chocs, il résulte des observations de Tredgold qu'il convient de faire R = 1500000 pour les dents en fonte.

Remplaçant R par sa valeur dans la formule précédente, on a

$$PL = 250\,000bh^2.$$

Cependant, pour des roues faites avec soin et transmettant un effort régulier, on peut poser

$$PL = 300\,000bh^2.$$

Dans la pratique on fait $L = 1.2h$ pour les engrenages qui transmettent de grands efforts, et $L = 1.5h$ pour ceux qui ne transmettent que de faibles charges.

La valeur de $b$ est comprise entre $6h$ et $3h$, suivant que P est plus ou moins grand ; c'est ce que fait voir le tableau suivant :

| Valeurs de P en kilog. | Valeurs relatives de $b$ et $h$. |
|---|---|
| 100 à 250 | $b = 3{,}0h$ |
| 250 à 500 | $b = 3{,}5h$ |
| 500 à 800 | $b = 4{,}0h$ |
| 800 à 1200 | $b = 5{,}0h$ |
| 1200 à 2000 | $b = 5{,}5h$ |
| 2000 à 3000 | $b = 6{,}0h$ |

Pour les dents en bois durs, tels que charme, racine de poirier, de sorbier..., on peut conserver entre L, $b$ et $h$ les mêmes relations que pour la fonte et poser

$$PL = 145\,000bh^2.$$

**241.** *Jante de roue d'engrenage.* Sa largeur est égale à celle de la dent, et l'expérience prouve que son épaisseur doit être égale à celle $h$ de la dent ; on la fait égale aux 2/3 de $h$ quand on la renforce, comme on le fait souvent, par une nervure intérieure dont la saillie est à peu près égale à celle des dents.

Pour les roues soumises à des chocs, ou transmettant des efforts qui exigeraient des valeurs de $h$ trop considérables, on renforce la jante

par des joues qui emboîtent aussi les dents, de manière à ne laisser que 0m.010 ou 0m.012 de jeu entre les joues des deux roues engrenées; l'épaisseur de ces joues varie de 1/2 aux 2/3 de l'épaisseur $h$ de la dent. L'écartement des deux joues d'une même roue se fait égal à la largeur $b$ des dents de l'autre roue, plus un jeu de 0m.006 à 0m,008.

Pour les roues à dents de bois, la largeur totale de la jante est égale à la largeur $b$ des dents, augmentée de part et d'autre de la dent d'une quantité égale aux 2/3 de l'épaisseur $h$ de la dent. L'épaisseur de la jante se fait égale à $h$.

La queue de la dent a 4 à 6 millimètres de moins que la dent, dans le sens de la circonférence, et 8 à 10 parallèlement à l'axe. Ces queues font saillie de 0m.02 à 0m.025 à l'intérieur de la jante, où on les taille en queue d'aronde, de manière à pouvoir serrer les dents avec des coins.

**242.** *Bras de roue d'engrenage.* Pour des roues d'engrenage de 1m,30 de diamètre et au-dessous, il suffit de quatre bras; pour des diamètres de 1m,30 à 2m,50, on en emploie six; pour ceux de 2m,50 à 5m,00, huit, et pour ceux de 5m,00 à 7m,00, dix. Le nombre des bras ne dépend pas seulement du diamètre de la roue, mais aussi des proportions de la couronne, qui demande à être d'autant mieux soutenue, soit pour son coulage, soit pour son service, qu'elle est plus légère.

On peut encore, jusqu'à un certain point, considérer un bras comme étant un solide encastré par une extrémité et sollicité à l'autre par une certaine force; ainsi, en supposant que les nervures ne font que résister aux efforts latéraux, on peut poser

$$PL = \frac{Rbh^2}{6}. \qquad (220)$$

P effort tangentiel à la roue, et que la formule suppose n'agir à la fois que sur un seul bras;

L longueur totale du bras mesurée depuis le moyeu;

$b$ épaisseur du bras; elle varie ordinairement entre 1/4 et 1/5 de $h$;

$h$ hauteur du bras près du moyeu; c'est sa dimension suivant la direction de l'effort qui tend à le rompre;

R = 7000000, comme pour une pièce encastrée par une extrémité (220); cela suppose que la résistance que le bras qui travaille reçoit des autres compense l'effet des vibrations.

L'épaisseur des nervures est environ les 2/3 de celle du bras, et l'une et l'autre sont uniformes sur toute la longueur du bras. Les arêtes du bras sont droites, et la hauteur $h'$ près de la jante varie entre les 2/3 et les 3/4 de la hauteur $h$ près du moyeu.

La largeur du bras, comptée sur les nervures, se fait à peu près égale à la hauteur $h$ du corps du bras.

**243.** *Boulons et écrous.* M. Armengaud aîné, de la discussion des proportions adoptées par divers constructeurs et ingénieurs, a formé le tableau suivant pour les vis et boulons à filets triangulaires. La dernière colonne donne les tractions longitudinales que l'on fait supporter aux boulons (*Publication industrielle*).

| DIAMÈTRE extérieur. | DIAMÈTRE au fond des filets. | PROFONDEUR des filets. | PAS. | DIAMÈTRE extérieur de l'écrou à 6 pans. | HAUTEUR de l'écrou. | HAUTEUR de la tête du boulon. | TRACTION longitudinale. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| mill. | mill. | mill. | mill. | mill. | mill. | mill. | kilog. |
| 5 | 3.2 | 0.8 | 1.4 | 13.7 | 5 | 6 | 20 |
| 7.5 | 5.5 | 1.0 | 1.6 | 17 | 7.5 | 7.5 | 45 |
| 10 | 7.7 | 1.1 | 1.8 | 22 | 10 | 9.5 | 81 |
| 12.5 | 9.9 | 1.3 | 2.0 | 26 | 12.5 | 11 | 126 |
| 15 | 12.2 | 1.4 | 2.2 | 30 | 15 | 13 | 182 |
| 17.5 | 14.5 | 1.5 | 2.4 | 35 | 17.5 | 14.5 | 248 |
| 20 | 16.7 | 1.6 | 2.6 | 38 | 20 | 16.5 | 324 |
| 22.5 | 19.1 | 1.7 | 2.8 | 42 | 22.5 | 18 | 410 |
| 25 | 21.2 | 1.9 | 3.0 | 46 | 25 | 20 | 506 |
| 30 | 25.7 | 2.1 | 3.4 | 54 | 30 | 23.5 | 729 |
| 35 | 30.2 | 2.4 | 3.8 | 62 | 35 | 27 | 992 |
| 40 | 34.7 | 2.6 | 4.2 | 70 | 40 | 30.5 | 1 296 |
| 45 | 39.2 | 2.9 | 4.6 | 78 | 45 | 34 | 1 640 |
| 50 | 43.7 | 3.2 | 5.0 | 86 | 50 | 37.5 | 2 025 |
| 55 | 48.0 | 3.5 | 5.4 | 94 | 55 | 41 | 2 450 |
| 60 | 52.4 | 3.8 | 5.8 | 102 | 60 | 44.5 | 2 916 |
| 65 | 56.8 | 4.1 | 6.2 | 110 | 65 | 48 | 3 422 |
| 70 | 61.1 | 4.4 | 6.6 | 118 | 70 | 51.5 | 3 969 |
| 75 | 65.5 | 4.7 | 7.0 | 126 | 75 | 55 | 4 556 |
| 80 | 69.9 | 5.0 | 7.4 | 134 | 80 | 58.5 | 5 184 |

Le même auteur indique les dimensions suivantes pour les vis et boulons à filets carrés.

| DIAMÈTRE extérieur. | PROFONDEUR des filets. | PAS. | ÉPAISSEUR des filets. | HAUTEUR de l'écrou. | TRACTION longitudinale. |
|---|---|---|---|---|---|
| mill. | mill. | mill. | mill. | mill. | kilog. |
| 20 | 1.80 | 3.80 | 1.90 | 45.6 | 324 |
| 25 | 2.02 | 4.25 | 2.12 | 51.0 | 506 |
| 30 | 2.23 | 4.70 | 2.35 | 56.4 | 729 |
| 35 | 2.45 | 5.15 | 2.57 | 61.8 | 992 |
| 40 | 2.66 | 5.60 | 2.80 | 67.2 | 1 296 |
| 45 | 2.87 | 6.05 | 3.02 | 72.6 | 1 640 |
| 50 | 3.19 | 6.50 | 3.25 | 78.0 | 2 025 |
| 55 | 3.30 | 6.95 | 3.47 | 83.4 | 2 450 |
| 60 | 3.51 | 7.40 | 3.70 | 88.8 | 2 916 |
| 65 | 3.73 | 7.85 | 3.92 | 94.2 | 3 422 |
| 70 | 3.94 | 8.30 | 4.15 | 99.6 | 3 969 |
| 75 | 4.16 | 8.75 | 4.37 | 105.0 | 4 556 |
| 80 | 4.37 | 9.20 | 4.60 | 110.4 | 5 184 |
| 85 | 4.58 | 9.65 | 4.82 | 115.8 | 5 852 |
| 90 | 4.80 | 10.10 | 5.05 | 121.2 | 6 561 |
| 95 | 5.01 | 10.55 | 5.27 | 126.6 | 7 300 |
| 100 | 5.22 | 11.00 | 5.50 | 132.0 | 8 100 |
| 105 | 5.44 | 11.45 | 5.72 | 137.4 | 8 930 |
| 110 | 5.65 | 11.90 | 5.95 | 142.8 | 9 801 |
| 115 | 5.87 | 12.35 | 6.17 | 148.2 | 10 712 |
| 120 | 6.08 | 12.80 | 6.40 | 153.6 | 11 664 |

*Rosettes.* Les rosettes placées sous la tête des boulons sont percées d'un trou carré, et celles placées sous les écrous le sont d'un trou rond.

| | mill. | mill. | mill. | mill. | mill. | mill. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Diamètre | 108 | 84 | 58 | 48 | 34 | 26 |
| Épaisseur | 7 | 6 | 4 | 3 | 1 | 1 |
| Largeur du chanfrein au vif | 12 | 10 | 6 | 4 | » | » |
| Trous des rosettes. Équarrissage | 30 | 26 | 20 | 16 | » | » |
| Trous des rosettes. Diamètre | 28 | 24 | 19 | 15 | 11 | 9 |

**244.** *Vis à bois.* Tête fraisée avec une bordure mince (217).

| | mill. | mill. | mill. | mill. | mill. |
|---|---|---|---|---|---|
| Longueur totale, tête comprise | 60 | 46 | 25 | 25 | 20 |
| Longueur de la partie filetée | 35 | 30 | 17 | 17 | 13 |
| Diamètre de la tête | 17 | 15 | 12 | 10 | 8.5 |
| Diamètre de la tige sous la tête | 9 | 8 | 7 | 6 | 4.5 |
| Diamètre de la tige au bout | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 |
| Épaisseur de la tête | 5 | 4 | 4 | 3 | 2 |

**245.** *Classification des fils de fer selon la jauge de Limoges.*

| NUMÉROS. | DIAMÈTRE en millim. | NUMÉROS. | DIAMÈTRE en millim. | NUMÉROS. | DIAMÈTRE en millim. | NUMÉROS. | DIAMÈTRE en millim. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.39 | 7 | 1.12 | 13 | 1.91 | 19 | 3.95 |
| 1 | 0.45 | 8 | 1.24 | 14 | 2.02 | 20 | 4.50 |
| 2 | 0.56 | 9 | 1.35 | 15 | 2.14 | 21 | 5.10 |
| 3 | 0.67 | 10 | 1.46 | 16 | 2.25 | 22 | 5.65 |
| 4 | 0.79 | 11 | 1.68 | 17 | 2.84 | 23 | 6.20 |
| 5 | 0.90 | 12 | 1.80 | 18 | 3.40 | 24 | 6.80 |
| 6 | 1.01 | | | | | | |

**246.** *Tôles.* Les tôles fortes employées à la construction des chaudières à vapeur proviennent de fer de fonte au bois, affiné au bois. Les feuilles ont de 1 à 3 mètres de longueur sur $0^m,325$ à $1^m,50$ de largeur, et leur épaisseur varie de millimètre en millimètre depuis 4 jusqu'à 15.

Les tôles de fer de fonte au bois, affiné à la houille, sont employées à la confection des tuyaux de poêles, des cheminées, des toitures, etc.

**247.** *Fer-blanc.* La tôle est en fer de fonte au bois, affiné au bois. Les feuilles, laminées à l'épaisseur convenable, sont décapées, étamées, lavées et polies. Elles s'expédient en caisses de 100, 150, 200 et 225 feuilles, dont les dimensions et poids sont les suivants :

| NOMBRE de feuilles. | DIMENSION DES FEUILLES. | | POIDS bruts des caisses. |
|---|---|---|---|
| | Longueur. | Largeur. | |
| | m. | m. | kilog. |
| 100 | 0.435 | 0.325 | 48 à 69 |
| 100 | 0.490 | 0.350 | 73 à 85 |
| 150 | 0.405 | 0.310 | 78 à 103 |
| 150 | 0.325 | 0.245 | 28 à 53 |
| 200 | 0.380 | 0.270 | 67 à 87 |
| 225 | 0.350 | 0.260 | 58 à 88 |

248. *Classification des fers*, d'après M. Flachat.

| DÉNOMINATION. | LARGEUR. | ÉPAISSEUR. | DIAMÈTRE. | CÔTÉ. |
|---|---|---|---|---|
| | millim. | millim. | millim. | millim. |
| Fers marchands plats. . . | 40 à 160 | 10 et au-dessus. | » | » |
| *Id.* méplats. . | 25 à 40 | 15 *id.* | » | » |
| *Id.* carrés. . . | » | » | » | 35 à 100 |
| Fers de petite forge, plats. | 25 à 40 | 8 à 9 | » | » |
| *Id.* méplats. . | 25 à 30 | 9 à 14 | » | » |
| *Id.* carrés. . . | » | » | » | 19 à 20 |
| Martinets ronds. . . . . | » | » | 10 à 100 | » |
| Carillons. . . . . | » | » | » | 10 à 20 |
| Bandelettes. . . . . | 15 à 40 | 5 à 7 | » | » |
| Fenderie, verges. . . . . | 5 à 25 | 6 à 14 | » | » |
| Aplatis pour carrosserie. . | 40 à 70 | 6 et au-dessus. | » | » |
| Aplatis pour cuves. . . . . | 25 à 100 | 3 à 8 | » | » |

# DEUXIÈME PARTIE.

## Chaleur appliquée aux arts industriels.

---

### POUVOIRS DES CORPS POUR LA CHALEUR.

249. *Pouvoir émissif ou rayonnant.* Tous les corps, quelles que soient leur nature et leur température, jouissent de la propriété d'émettre ou de rayonner de la chaleur. Chaque rayon émané se meut en ligne droite, et son intensité en un point quelconque varie, pour une même source de chaleur, en raison inverse du carré de la distance de ce point à la source. La chaleur rayonnée traverse l'air sans l'échauffer. La quantité plus ou moins grande de chaleur émise ou rayonnée par un corps est ce que l'on appelle le *pouvoir émissif ou rayonnant* de ce corps.

*TABLEAU des valeurs relatives des pouvoirs émissifs ou rayonnants de quelques corps placés dans les mêmes circonstances de température et de milieu environnant.*

| DÉSIGNATION DES CORPS. | VALEURS relatives des pouvoirs émissifs ou rayonnants, d'après | |
|---|---|---|
| | Leslie. | M. Melloni. |
| Noir de fumée | 100 | 100 |
| Eau | 100 | » |
| Carbonate de plomb | » | 100 |
| Papier à écrire | 98 | » |
| Ivoire, jais, marbre | » | 93 à 98 |
| Colle de poisson | » | 91 |
| Verre ordinaire | 90 | » |
| Encre de Chine | 88 | 85 |
| Glace | 85 | » |
| Gomme laque | » | 72 |
| Mercure | 20 | » |
| Plomb brillant | 19 | » |
| Fer poli | 15 | » |
| Étain, argent, or | 12 | » |
| Surface métallique | » | 12 |

Le pouvoir émissif d'une surface métallique est d'autant plus petit que cette surface est mieux polie.

*TABLEAU des pouvoirs émissifs ou rayonnants de quelques corps, d'après les expériences récentes de MM. de La Provostaye et Desains.*

| DÉSIGNATION DES CORPS. | POUVOIRS. |
|---|---|
| Noir de fumée | 100 |
| Platine sortant du laminoir | 10.74 |
| Platine bruni | 9.09 |
| Argent mat chimiquement déposé sur cuivre | 5.37 |
| Le même, bruni | 2.10 |
| Argent vierge sortant du laminoir | 2.94 |
| Le même, bruni | 2.38 |
| Le même, maintenu dix ou douze heures à 120° | 2.77 |
| Argent appliqué en feuilles minces sur l'argent ou sur le platine | 2.04 |
| Or appliqué en feuilles | 4.25 |
| Cuivre rouge en lames polies, disposées pour la gravure | 4.76 |
| Cuivre en feuilles appliqué sur du cuivre | 5.55 |

*Variations des pouvoirs émissifs avec l'inclinaison, d'après ces derniers expérimentateurs.*

| INCLINAISON. | NOIR DE FUMÉE déposé à la lampe. | VERRE. | CÉRUSE à l'essence. | OCRE ROUGE à l'essence. | NOIR à l'essence. |
|---|---|---|---|---|---|
| 0° | 100 | 90.0 | 100 | 100 | 100 |
| 60 | » | 83.6 | 94.6 | » | » |
| 70 | 100 | 75.01 | 83.9 | 91.2 | » |
| 75 | » | 65.3 | » | » | » |
| 80 | 100 | 55.44 | 65.9 | 82.3 | 76 |

250. *Pouvoirs absorbant et réflecteur.* Lorsqu'un corps poli est rencontré par un rayon de chaleur, il en absorbe une partie et réfléchit l'autre. La portion plus ou moins grande de chaleur absorbée est ce qu'on appelle le *pouvoir absorbant* de ce corps, et la portion réfléchie est son pouvoir *réflecteur*.

On admet que le pouvoir absorbant d'un corps est égal à son pouvoir émissif, et qu'il est le complément de son pouvoir réflecteur : ainsi le pouvoir émissif d'un corps étant 90, son pouvoir absorbant sera 90, et son pouvoir réflecteur 10; ces nombres supposent que la quantité totale de chaleur qui vient frapper le corps est représentée par 100.

*TABLEAU des valeurs relatives des pouvoirs réflecteurs de quelques corps*, d'après Leslie.

| DÉSIGNATION DES CORPS. | VALEURS relatives des pouvoirs réflecteurs. |
|---|---|
| Cuivre jaune | 100 |
| Argent | 90 |
| Étain en feuilles | 85 |
| Bloc d'étain plané | 80 |
| Acier | 70 |
| Plomb | 60 |
| Étain mouillé de mercure, avec surface brillante | 50 |
| Verre | 10 |
| Verre couvert d'une couche de cire ou d'huile | 5 |
| Noir de fumée | 0 |

D'après M. Melloni, le pouvoir absorbant d'un corps varie bien dans le même sens que le pouvoir émissif; mais, de plus, il est variable, pour un même corps, suivant la nature de la source de chaleur.

*TABLEAU des résultats obtenus par* M. Melloni.

| DÉSIGNATION DES CORPS. | POUVOIRS ABSORBANTS, la source de chaleur étant | | | |
|---|---|---|---|---|
| | une lampe. | du platine incandescent. | du cuivre à 400°. | du cuivre à 100°. |
| Noir de fumée | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Carbonate de plomb | 53 | 56 | 89 | 100 |
| Colle de poisson | 52 | 54 | 64 | 91 |
| Encre de Chine | 96 | 95 | 87 | 85 |
| Gomme laque | 43 | 47 | 70 | 72 |
| Surface métallique | 14 | 13.5 | 13 | 13 |

*TABLEAU des pouvoirs réflecteurs de quelques métaux très-répandus, d'après* MM. de La Provostaye et Desains.

| DÉSIGNATION DES CORPS. | POUVOIRS. |
|---|---|
| Plaqué d'argent | 97 |
| Acier doré poli | 97 |
| Argent fondu ou battu, bien poli | 96 ou 97 |
| Or plaqué | 95 |

| DÉSIGNATION DES CORPS. | POUVOIRS. |
|---|---|
| Laiton fondu ou battu, poli vif. | 93 |
| Cuivre rouge. | 93 |
| Fer cuivré. | 93 |
| Cuivre argenté un peu laiteux. | 91 |
| Laiton battu, poli gras. | 91 |
| Cuivre rouge verni. | 86 |
| Métal des miroirs récemment poli. | 85.5 |
| *Id.* un peu altéré. | 82.5 |
| Platine en lame. | 83 |
| Platine chimiquement déposé sur cuivre. | 83 |
| Platine en couches 5 à 6 fois plus épaisses, poli médiocre. | 76 |
| Acier. | 82.5 |
| Zinc. | 81 |
| Fer. | 77 |
| Fonte. | 74 ou 75 |
| Mercure liquide. | environ 77 |

D'après ces expérimentateurs, les pouvoirs réflecteurs des métaux ne paraissent pas changer avec l'incidence pour des angles inférieurs à 70°; mais pour des angles supérieurs, ils diminuent sensiblement; ainsi, pour les angles 75° ou 80°, ils deviennent à peu près les 0,94 de ce qu'ils étaient sous des incidences plus petites. Il a été impossible d'observer avec sécurité dans des incidences plus rasantes, de sorte qu'on ne peut dire si la diminution continue jusqu'à 90°.

**251.** *Pouvoir conducteur des corps pour la chaleur.* Tous les corps ne conduisent pas également bien la chaleur; c'est ce que fait voir le tableau suivant des pouvoirs conducteurs relatifs de quelques corps, d'après M. Despretz, et d'après les expériences récentes de MM. Wiedemann et Franz.

| DÉSIGNATION des corps. | POUVOIRS relatifs. | | DÉSIGNATION des corps. | POUVOIRS relatifs. | |
|---|---|---|---|---|---|
| | M. Despretz. | MM. Wiedemann et Frantz. | | M. Despretz. | MM. Wiedemann et Frantz. |
| Or. | 1000.0 | 1000 | Zinc. | 363.0 | » |
| Platine. | 981.0 | 458 | Étain. | 303.9 | 273 |
| Argent. | 973.0 | 1880 | Plomb. | 179.5 | 160 |
| Cuivre. | 898.2 | 1383 | Marbre. | 23.6 | » |
| Laiton. | 748.6 | 444 | Porcelaine. | 12.2 | » |
| Fonte. | 561.5 | » | Terre cuite. | 11.4 | » |
| Fer. | 374.3 | 224 | Palladium. | » | 418 |
| Acier. | » | 218 | Bismuth. | » | 34 |

Lorsqu'un corps conduit bien la chaleur, il prend le nom de *bon conducteur de la chaleur;* si, au contraire, il la conduit mal, il prend le nom de *mauvais conducteur de la chaleur.*

Les corps composés de fibres très-fines, comme le coton, la laine, l'édredon, l'ouate, le son, la paille, le charbon très-divisé, sont les plus mauvais conducteurs de la chaleur. Les liquides et les gaz sont aussi des mauvais conducteurs de la chaleur; aussi, lorsqu'on veut les échauffer, faut-il avoir recours à l'échauffement par contact en produisant des courants dans ces matières; ce que du reste on obtient naturellement en plaçant le foyer sous les liquides ou les gaz à échauffer. Si l'on gène les mouvements des liquides ou des gaz au moyen de corps fibreux, l'échauffement est considérablement retardé.

## ÉVALUATION DES TEMPÉRATURES.

252. *Thermomètres.* Ces instruments, fondés sur les variations de volume que font subir aux corps les variations de température, servent à apprécier l'état de chaleur dans lequel se trouvent les corps.

Dans le thermomètre centigrade, le nombre 0° de l'échelle correspond à la température constante de la glace fondante, et le nombre 100°, à la température, aussi constante, de l'ébullition de l'eau pure sous la pression atmosphérique de $0^m,76$ de mercure. Chaque division du thermomètre représente 1 degré centigrade.

Dans le thermomètre de Réaumur, 0° correspond à la glace fondante, et 80° à l'eau bouillante.

Dans le thermomètre Farenheit, 32° correspond à la glace fondante, et 212° à l'ébullition de l'eau.

Les relations qui existent entre les températures indiquées par ces différents thermomètres sont :

$$C = \frac{5}{4} R, \quad C = \frac{5}{9} (F - 32) \quad \text{et} \quad R = \frac{4}{9} (F - 32).$$

C température en degrés centigrades;
R *id.* *id.* Réaumur;
F *id.* *id.* Farenheit.

*De ces formules on conclut les résultats du tableau suivant :*

| NOMBRES de degrés Réaumur ou Farenheit. | TEMPÉRATURES en degrés centigrades, les nombres de la première colonne exprimant des degrés | | NOMBRES de degrés Réaumur ou Farenheit. | TEMPÉRATURES en degrés centigrades, les nombres de la première colonne exprimant des degrés | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Réaumur. | Farenheit. | | Réaumur. | Farenheit. |
| | deg. cent. | deg. cent. | | deg. cent. | deg. cent. |
| —28 | —35.00 | —33.33 | +20 | +25.00 | — 6.67 |
| 27 | 33.75 | 32.78 | 21 | 26.25 | 6.11 |
| 26 | 32.50 | 32.22 | 22 | 27.50 | 5.56 |
| 25 | 31.25 | 31.67 | 23 | 28.75 | 5.00 |
| 24 | 30.00 | 31.11 | 24 | 30.00 | 4.45 |
| 23 | 28.75 | 30.56 | 25 | 31.25 | 3.90 |
| 22 | 27.50 | 30.00 | 26 | 32.50 | 3.34 |
| 21 | 26.25 | 29.45 | 27 | 33.75 | 2.78 |
| 20 | 25.00 | 28.89 | 28 | 35.00 | 2.23 |
| 19 | 23.75 | 28.34 | 29 | 36.25 | 1.67 |
| 18 | 22.50 | 27.78 | 30 | 37.50 | 1.11 |
| 17 | 21.25 | 27.23 | 31 | 38.75 | 0.56 |
| 16 | 20.00 | 26.67 | 32 | 40.00 | 0.00 |
| 15 | 18.75 | 26.12 | 33 | 41.25 | + 0.56 |
| 14 | 17.50 | 25.56 | 34 | 42.50 | 1.11 |
| 13 | 16.25 | 25.01 | 35 | 43.75 | 1.67 |
| 12 | 15.00 | 24.45 | 36 | 45.00 | 2.23 |
| 11 | 13.75 | 23.90 | 37 | 46.25 | 2.78 |
| 10 | 12.50 | 23.34 | 38 | 47.50 | 3.34 |
| 9 | 11.25 | 22.79 | 39 | 48.75 | 3.90 |
| 8 | 10.00 | 22.22 | 40 | 50.00 | 4.45 |
| 7 | 8.75 | 21.67 | 41 | 51.25 | 5.00 |
| 6 | 7.50 | 21.11 | 42 | 52.50 | 5.56 |
| 5 | 6.25 | 20.56 | 43 | 53.75 | 6.11 |
| 4 | 5.00 | 20.00 | 44 | 55.00 | 6.67 |
| 3 | 3.75 | 19.45 | 45 | 56.25 | 7.23 |
| 2 | 2.50 | 18.89 | 46 | 57.50 | 7.78 |
| 1 | 1.25 | 18.34 | 47 | 58.75 | 8.34 |
| 0 | 0.00 | 17.78 | 48 | 60.00 | 8.89 |
| + 1 | + 1.25 | 17.23 | 49 | 61.25 | 9.45 |
| 2 | 2.50 | 16.67 | 50 | 62.50 | 10.00 |
| 3 | 3.75 | 16.11 | 51 | 63.75 | 10.56 |
| 4 | 5.00 | 15.56 | 52 | 65.00 | 11.11 |
| 5 | 6.25 | 15.00 | 53 | 66.25 | 11.67 |
| 6 | 7.50 | 14.45 | 54 | 67.50 | 12.23 |
| 7 | 8.75 | 13.90 | 55 | 68.75 | 12.78 |
| 8 | 10.00 | 13.34 | 56 | 70.00 | 13.34 |
| 9 | 11.25 | 12.78 | 57 | 71.25 | 13.90 |
| 10 | 12.50 | 12.23 | 58 | 72.50 | 14.45 |
| 11 | 13.75 | 11.67 | 59 | 73.75 | 15.00 |
| 12 | 15.00 | 11.11 | 60 | 75.00 | 15.56 |
| 13 | 16.25 | 10.56 | 61 | 76.25 | 16.11 |
| 14 | 17.50 | 10.00 | 62 | 77.50 | 16.67 |
| 15 | 18.75 | 9.45 | 63 | 78.75 | 17.23 |
| 16 | 20.00 | 8.89 | 64 | 80.00 | 17.78 |
| 17 | 21.25 | 8.34 | 65 | 81.25 | 18.34 |
| 18 | 22.50 | 7.78 | 66 | 82.50 | 18.89 |
| 19 | 23.75 | 7.23 | 67 | 83.75 | 19.45 |

| NOMBRES de degrés Réaumur ou Farenheit. | TEMPÉRATURES en degrés centigrades, les nombres de la première colonne exprimant des degrés | | NOMBRES de degrés Réaumur ou Farenheit. | TEMPÉRATURES en degrés centigrades, les nombres de la première colonne exprimant des degrés | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Réaumur. | Farenheit. | | Réaumur. | Farenheit. |
| | deg. cent. | deg. cent. | | deg. cent. | deg. cent. |
| +68 | + 85.00 | +20.00 | +115 | +143.75 | +46.11 |
| 69 | 86.25 | 20.56 | 116 | 145.00 | 46.67 |
| 70 | 87.50 | 21.11 | 117 | 146.25 | 47.23 |
| 71 | 88.75 | 21.67 | 118 | 147.50 | 47.78 |
| 72 | 90.00 | 22.23 | 119 | 148.75 | 48.34 |
| 73 | 91.25 | 22.78 | 120 | 150.00 | 48.90 |
| 74 | 92.50 | 23.34 | 121 | 151.25 | 49.45 |
| 75 | 93.75 | 23.90 | 122 | 152.50 | 50.00 |
| 76 | 95.00 | 24.45 | 123 | 153.75 | 50.56 |
| 77 | 96.25 | 25.00 | 124 | 155.00 | 51.11 |
| 78 | 97.50 | 25.56 | 125 | 156.25 | 51.67 |
| 79 | 98.75 | 26.12 | 126 | 157.50 | 52.23 |
| 80 | 100.00 | 26.67 | 127 | 158.75 | 52.78 |
| 81 | 101.25 | 27.23 | 128 | 160.00 | 53.34 |
| 82 | 102.50 | 27.78 | 129 | 161.25 | 53.90 |
| 83 | 103.75 | 28.34 | 130 | 162.50 | 54.45 |
| 84 | 105.00 | 28.89 | 131 | 163.75 | 55.00 |
| 85 | 106.25 | 29.45 | 132 | 165.00 | 55.56 |
| 86 | 107.50 | 30.00 | 133 | 166.25 | 56.11 |
| 87 | 108.75 | 30.56 | 134 | 167.50 | 56.67 |
| 88 | 110.00 | 31.11 | 135 | 168.75 | 57.23 |
| 89 | 111.25 | 31.67 | 136 | 170.00 | 57.78 |
| 90 | 112.50 | 32.22 | 137 | 171.25 | 58.34 |
| 91 | 113.75 | 32.78 | 138 | 172.50 | 58.90 |
| 92 | 115.00 | 33.33 | 139 | 173.75 | 59.45 |
| 93 | 116.25 | 33.89 | 140 | 175.00 | 60.00 |
| 94 | 117.50 | 34.45 | 141 | 176.25 | 60.56 |
| 95 | 118.75 | 35.00 | 142 | 177.50 | 61.11 |
| 96 | 120.00 | 35.56 | 143 | 178.75 | 61.67 |
| 97 | 121.25 | 36.11 | 144 | 180.00 | 62.23 |
| 98 | 122.50 | 36.67 | 145 | 181.25 | 62.78 |
| 99 | 123.75 | 37.23 | 146 | 182.50 | 63.34 |
| 100 | 125.00 | 37.78 | 147 | 183.75 | 63.90 |
| 101 | 126.25 | 38.34 | 148 | 185.00 | 64.45 |
| 102 | 127.50 | 38.90 | 149 | 186.25 | 65.00 |
| 103 | 128.75 | 39.45 | 150 | 187.50 | 65.56 |
| 104 | 130.00 | 40.00 | 151 | 188.75 | 66.11 |
| 105 | 131.25 | 40.56 | 152 | 190.00 | 66.67 |
| 106 | 132.50 | 41.11 | 153 | 191.25 | 67.23 |
| 107 | 133.75 | 41.67 | 154 | 192.50 | 67.78 |
| 108 | 135.00 | 42.23 | 155 | 193.75 | 68.34 |
| 109 | 136.25 | 42.78 | 156 | 195.00 | 68.90 |
| 110 | 137.50 | 43.34 | 157 | 196.25 | 69.45 |
| 111 | 138.75 | 43.90 | 158 | 197.50 | 70.00 |
| 112 | 140.00 | 44.45 | 159 | 198.75 | 70.56 |
| 113 | 141.25 | 45.00 | 160 | 200.00 | 71.11 |
| 114 | 142.50 | 45.56 | | | |

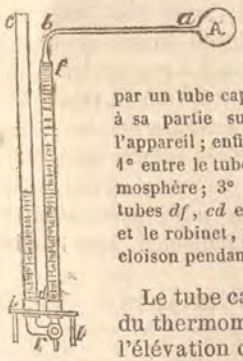
| TEMPÉRATURES en degrés | | TEMPÉRATURES en degrés | | TEMPÉRATURES en degrés | | TEMPÉRATURES en degrés | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Farenh. | centigrades. | Farenh. | centigrades. | Farenh. | centigrades. | Farenh. | centigrades. |
| +161 | +71.67 | +219 | +103.90 | +277 | +136.11 | +335 | +168.34 |
| 162 | 72.23 | 220 | 104.45 | 278 | 136.67 | 336 | 168.90 |
| 163 | 72.76 | 221 | 105.00 | 279 | 137.23 | 337 | 169.45 |
| 164 | 73.34 | 222 | 105.56 | 280 | 137.78 | 338 | 170.00 |
| 165 | 73.90 | 223 | 106.11 | 281 | 138.34 | 339 | 170.56 |
| 166 | 74.45 | 224 | 106.67 | 282 | 138.90 | 340 | 171.11 |
| 167 | 75.00 | 225 | 107.23 | 283 | 139.45 | 341 | 171.67 |
| 168 | 75.56 | 226 | 107.78 | 284 | 140.00 | 342 | 172.23 |
| 169 | 76.11 | 227 | 108.34 | 285 | 140.56 | 343 | 172.78 |
| 170 | 76.67 | 228 | 108.90 | 286 | 141.11 | 344 | 173.34 |
| 171 | 77.23 | 229 | 109.45 | 287 | 141.67 | 345 | 173.90 |
| 172 | 77.78 | 230 | 110.00 | 288 | 142.23 | 346 | 174.45 |
| 173 | 78.34 | 231 | 110.56 | 289 | 142.78 | 347 | 175.00 |
| 174 | 78.90 | 232 | 111.11 | 290 | 143.34 | 348 | 175.56 |
| 175 | 79.45 | 233 | 111.67 | 291 | 143.90 | 349 | 176.11 |
| 176 | 80.00 | 234 | 112.23 | 292 | 144.45 | 350 | 176.67 |
| 177 | 80.56 | 235 | 112.78 | 293 | 145.00 | 351 | 177.23 |
| 178 | 81.11 | 236 | 113.34 | 294 | 145.56 | 352 | 177.78 |
| 179 | 81.67 | 237 | 113.90 | 295 | 146.11 | 353 | 178.34 |
| 180 | 82.23 | 238 | 114.45 | 296 | 146.67 | 354 | 178.90 |
| 181 | 82.78 | 239 | 115.00 | 297 | 147.23 | 355 | 179.45 |
| 182 | 83.34 | 240 | 115.56 | 298 | 147.78 | 356 | 180.00 |
| 183 | 83.90 | 241 | 116.11 | 299 | 148.34 | 357 | 180.56 |
| 184 | 84.45 | 242 | 116.67 | 300 | 148.90 | 358 | 181.11 |
| 185 | 85.00 | 243 | 117.23 | 301 | 149.45 | 359 | 181.67 |
| 186 | 85.56 | 244 | 117.78 | 302 | 150.00 | 360 | 182.23 |
| 187 | 86.11 | 245 | 118.34 | 303 | 150.56 | 361 | 182.78 |
| 188 | 86.67 | 246 | 118.90 | 304 | 151.11 | 362 | 183.34 |
| 189 | 87.23 | 247 | 119.45 | 305 | 151.67 | 363 | 183.90 |
| 190 | 87.78 | 248 | 120.00 | 306 | 152.23 | 364 | 184.45 |
| 191 | 88.34 | 249 | 120.56 | 307 | 152.78 | 365 | 185.00 |
| 192 | 88.90 | 250 | 121.11 | 308 | 153.34 | 366 | 185.56 |
| 193 | 89.45 | 251 | 121.67 | 309 | 153.90 | 367 | 186.11 |
| 194 | 90.00 | 252 | 122.23 | 310 | 154.45 | 368 | 186.67 |
| 195 | 90.56 | 253 | 122.78 | 311 | 155.00 | 369 | 187.23 |
| 196 | 91.11 | 254 | 123.34 | 312 | 155.56 | 370 | 187.78 |
| 197 | 91.67 | 255 | 123.90 | 313 | 156.11 | 371 | 188.34 |
| 198 | 92.23 | 256 | 124.45 | 314 | 156.67 | 372 | 188.90 |
| 199 | 92.78 | 257 | 125.00 | 315 | 157.23 | 373 | 189.45 |
| 200 | 93.34 | 258 | 125.56 | 316 | 157.78 | 374 | 190.00 |
| 201 | 93.90 | 259 | 126.11 | 317 | 158.34 | 375 | 190.56 |
| 202 | 94.45 | 260 | 126.67 | 318 | 158.90 | 376 | 191.11 |
| 203 | 95.00 | 261 | 127.23 | 319 | 159.45 | 377 | 191.67 |
| 204 | 95.56 | 262 | 127.78 | 320 | 160.00 | 378 | 192.23 |
| 205 | 96.11 | 263 | 128.34 | 321 | 160.56 | 379 | 192.78 |
| 206 | 96.67 | 264 | 128.90 | 322 | 161.11 | 380 | 193.34 |
| 207 | 97.23 | 265 | 129.45 | 323 | 161.67 | 381 | 193.90 |
| 208 | 97.78 | 266 | 130.00 | 324 | 162.23 | 382 | 194.45 |
| 209 | 98.34 | 267 | 130.56 | 325 | 162.78 | 383 | 195.00 |
| 210 | 98.90 | 268 | 131.11 | 326 | 163.34 | 384 | 195.56 |
| 211 | 99.45 | 269 | 131.67 | 327 | 163.90 | 385 | 196.11 |
| 212 | 100.00 | 270 | 132.23 | 328 | 164.45 | 386 | 196.67 |
| 213 | 100.56 | 271 | 132.78 | 329 | 165.00 | 387 | 197.23 |
| 214 | 101.11 | 272 | 133.34 | 330 | 165.56 | 388 | 197.78 |
| 215 | 101.67 | 273 | 133.90 | 331 | 166.11 | 389 | 198.34 |
| 216 | 102.23 | 274 | 134.45 | 332 | 166.67 | 390 | 198.90 |
| 217 | 102.78 | 275 | 135.00 | 333 | 167.23 | 391 | 199.45 |
| 218 | 103.34 | 276 | 135.56 | 334 | 167.78 | 392 | 200.00 |

253. Les *thermomètres à gaz* présentent sur le thermomètre à mercure, et en général sur les thermomètres formés par les substances solides et liquides, un avantage qui tient à la grandeur de la dilatation de la substance thermométrique. Dans un thermomètre quelconque, formé par une substance liquide ou gazeuse, les indications de l'instrument dépendent de la dilatation de cette substance et de celle de l'enveloppe. Or la dilatation du mercure n'est guère que sept fois celle du verre qui le renferme; les variations que l'on remarque dans la loi de dilatation des différentes espèces de verre forment donc des fractions très-sensibles des dilatations apparentes du mercure, et influent par suite d'une manière notable sur les indications de l'instrument. Dans le thermomètre à gaz, au contraire, la dilatation du gaz étant 160 fois celle du verre, les variations dans la loi de dilatation des diverses espèces de verre n'influent plus sensiblement sur les indications de l'appareil, et n'empêchent pas les instruments d'être comparables.

Le gaz d'un thermomètre peut se trouver dans des conditions telles, que la pression soit constante et que son volume varie, ou que son volume soit constant et que sa pression varie.

Dans le premier cas, fig. 61 :

Fig. 61.




Le thermomètre à gaz est composé d'un réservoir A, que l'on place dans l'enceinte dont on veut connaître la température; d'un tube calibré *df*, réuni au réservoir A par un tube capillaire *ab* qui l'éloigne de l'enceinte; d'un tube *cd*, ouvert à sa partie supérieure, et par lequel on introduit du mercure dans l'appareil; enfin d'un robinet *r*, établissant à volonté la communication : 1° entre le tube *df* et l'atmosphère; 2° entre le bas du tube *cd* et l'atmosphère; 3° entre les deux tubes *df*, *cd*; 4° simultanément entre les tubes *df*, *cd* et l'atmosphère. La plaque de fonte *i*, qui relie les tubes et le robinet, porte deux pattes qui servent à fixer l'appareil contre une cloison pendant l'expérience.

Le tube calibré *df* remplit les fonctions de la tige divisée du thermomètre à mercure, et sert à recueillir le gaz que l'élévation de la température chasse du réservoir A; ce tube est d'ailleurs maintenu à une température constante peu différente de celle de l'air ambiant. A un moment quelconque de l'expérience, le gaz renfermé dans l'appareil se compose de deux parties : la première, qui occupe le réservoir A, se trouve à la température $x$; la seconde, recueillie dans le tube *df*, se trouve à la température ambiante $t$. Ces deux portions de gaz supportent la même pression, que l'on peut d'ailleurs rendre aussi rapprochée que l'on veut de la pression atmosphérique à l'aide du robinet $r$; on établit la communication simultanée entre les deux tubes *df*, *cd*, et avec l'atmosphère, de manière à faire écouler le mercure jusqu'à ce qu'il ait pris le même niveau dans les deux tubes.

Appelant :

V le volume du réservoir A à la température 0°;
$k$ le coefficient de dilatation cubique moyen du réservoir A depuis 0° jusqu'à la température à évaluer $x$;
$\alpha$ le coefficient de dilatation du gaz, que l'on suppose constant;
$v$ le volume que l'air occupe dans le tube gradué $df$ à la température $t$, quand le réservoir A est placé dans la glace fondante;
$v'$ le volume que l'air occupe dans $df$ à la même température $t$ quand le réservoir A est la température $x$;
H la force élastique du gaz en millimètres; H sera égal à la pression atmosphérique si le mercure a le même niveau dans les deux tubes $df$, $cd$;
H' la force élastique du gaz quand le réservoir A est à la température $x$; à l'aide du robinet $r$, on pourra faire en sorte que H' diffère le moins possible de H;
$\delta$ la densité du gaz à 0° et sous la pression de 760 millimètres.

Suivant que le réservoir A est à la température 0° ou à la température $x$, le poids du gaz contenu dans l'appareil est exprimé par

$$\left(\mathrm{V} + \frac{v}{1+\alpha t}\right)\delta \times \frac{\mathrm{H}}{760} \quad \text{ou} \quad \left(\mathrm{V}\frac{1+kx}{1+\alpha x} + v'\frac{1}{1+\alpha t}\right)\delta \times \frac{\mathrm{H}'}{760}.$$

Ces deux poids étant nécessairement égaux, on a donc

$$\left(\mathrm{V} + \frac{v}{1+\alpha t}\right)\frac{\mathrm{H}}{\mathrm{H}'} = \mathrm{V}\frac{1+kx}{1+\alpha x} + \frac{v'}{1+\alpha t}.$$

Équation qui permet de calculer $x$.

C'est cette disposition que M. Pouillet a employée comme pyromètre à air (*Traité de physique*) (254); mais M. Regnault a cru devoir la rejeter pour thermomètre à air. Elle présente un inconvénient très-grave quand l'appareil est destiné à mesurer des températures élevées; dans ce cas, la plus grande partie de l'air se trouve dans le tube calibré $df$, et il n'en reste plus qu'une portion très-petite dans le réservoir A; de sorte que la partie qui sortira maintenant par une nouvelle élévation de température sera très-petite, et se mesurera difficilement dans le tube calibré avec une précision suffisante.

Si la température $x$ s'élève de $dx$, le volume $v'$ deviendra $v' + dv'$, et l'on déduit de l'équation précédente

$$\frac{1}{\mathrm{V}} \times \frac{1}{1+\alpha t} \times \frac{dv'}{dx} = \alpha\frac{1+kx}{(1+\alpha x)^2} - k\frac{1}{1+\alpha x}.$$

Ainsi $dv'$, qui représente la sensibilité de l'appareil, varie à peu près en raison inverse du carré de $1 + \alpha x$.

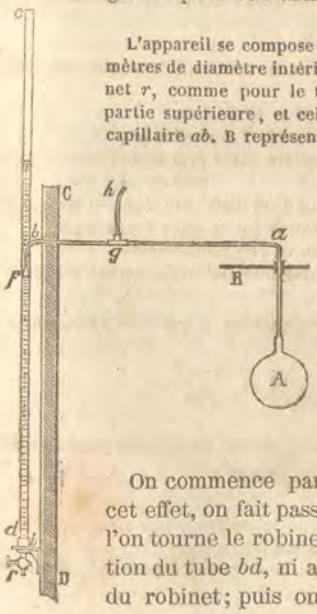
M. Regnault, dans ses recherches, a fait usage du thermomètre à air, dans lequel le volume du gaz est maintenu constant. La température est évaluée à l'aide de l'augmentation de force élastique du gaz, due à la dilatation qu'il aurait subie par suite de son accroissement de température, et cela en admettant la loi de Mariotte sur la compression des gaz (262). Ce thermomètre est plus commode que celui à pression constante, et il donne plus de précision; de plus, il a l'avantage de pré-

senter autant de sensibilité dans les hautes températures que dans les basses.

Si l'on veut mesurer des températures très-élevées, par exemple, si l'appareil doit servir comme pyromètre à air (254), la force élastique du gaz intérieur devenant très-considérable, il est à craindre que l'enveloppe ne subisse une déformation permanente sous l'influence de cette grande pression intérieure. On remédie à cet inconvénient en introduisant dans l'appareil de l'air sous une pression initiale plus faible que celle de l'atmosphère, lorsque le réservoir est à 0°. On peut, de cette manière, maintenir les forces élastiques entre des limites aussi resserrées que l'on veut. Il est clair, d'ailleurs, que l'appareil devient d'autant moins sensible que la force élastique du gaz à 0° est plus faible; mais comme la mesure des forces élastiques se fait avec une précision extrême, les indications de l'appareil présenteront encore une exactitude suffisante dans le plus grand nombre de cas, lors même que la pression initiale du gaz à 0° ne sera que de 1/4 d'atmosphère.

Quoique la valeur absolue du coefficient de dilatation d'un gaz change très-notablement avec sa densité, il résulte des expériences faites par M. Regnault que des thermomètres à gaz, chargés avec des gaz de nature différente, marchent d'accord entre eux lorsqu'ils ont été réglés pour des points fixes de 0° et de 100°.

Fig. 62. La figure 62 représente la disposition employée par M. Regnault pour son thermomètre à gaz.




L'appareil se compose de deux tubes en verre *df*, *cd*, de 12 à 14 millimètres de diamètre intérieur, mastiqués dans une pièce de fonte *i* à robinet *r*, comme pour le thermomètre fig. 61. Le tube *cd* est ouvert à sa partie supérieure, et celui *df* communique avec le ballon A par un tube capillaire *ab*. B représente le couvercle de la chaudière dont on veut évaluer la température. CD cloison en bois à laquelle est fixé le manomètre-thermomètre, et qui le sépare de la chaudière.

La réunion des deux parties du tube capillaire *ab* se fait en amenant les bouts en contact, et en mastiquant par-dessus les deux bouts, qui ont le même diamètre, une petite tubulure *g* en laiton qui passe exactement à frottement. Cette tubulure reçoit un troisième tube capillaire *h* qui sert à mettre l'appareil en communication avec une pompe pneumatique, au moyen de laquelle on peut dessécher l'appareil et y introduire le gaz.

On commence par dessécher complétement l'appareil. A cet effet, on fait passer un peu de mercure dans le tube *bd*, et l'on tourne le robinet *r* de manière qu'il n'y ait communication du tube *bd*, ni avec le tube *cd*, ni avec l'ouverture libre du robinet; puis on met le tube *h* en communication avec

une pompe aspirante munie de plusieurs tubes remplis de pierre ponce imbibée d'acide sulfurique concentré, qui sont destinés à absorber l'humidité. On fait le vide un grand nombre de fois, et on laisse rentrer chaque fois l'air très-lentement. Pour être sûr que la dessiccation est complète, on maintient le ballon chauffé à 50 ou 60°. On sépare alors la pompe, mais en laissant le tube $h$ en communication avec un tube desséchant.

Cela fait, on enveloppe le ballon A de glace fondante, on établit la communication entre les tubes $bd$, $cd$; on verse du mercure dans le manomètre, de façon à affleurer le sommet de la colonne à un trait de repère $f$ tracé sur le tube $bd$, très-près de son extrémité supérieure. Les deux colonnes de mercure se mettent de niveau, puisque l'appareil communique avec l'atmosphère par le tube $h$. On ferme alors le tube $h$ à la lampe.

Si l'on voulait que la pression dans l'appareil fût inférieure à l'atmosphère, on pomperait par le tube $h$, et par la différence de niveau dans les deux colonnes du manomètre, on jugerait quand la raréfaction serait convenable; on fermerait alors l'appareil en fondant à la lampe le tube $h$, puis on verserait du mercure dans le manomètre de manière à affleurer le ménisque au repère $f$.

Soit :

| | |
|---|---|
| H | la pression atmosphérique; |
| $h$ | la différence de niveau du mercure dans les deux branches du manomètre quand le ballon A est dans la glace fondante; |
| H—h | la force élastique du gaz dans l'appareil. |
| V | la capacité à 0° du ballon A et de la portion de tube capillaire qui sera dans la chaudière. |
| $v$ | le petit volume d'air contenu dans la portion $bf$ du tube. |
| $v'$ | *id.* dans le tube $ab$ et l'appendice $gh$; |
| $t$ | la température indiquée par un thermomètre placé près de $bf$; |
| $t'$ | *id.* *id.* près de $ab$. |
| $t$ et $t'$ | doivent être les températures moyennes de l'air dans ces tubes, et dans la formule suivante on les suppose les mêmes avant et après l'expérience. |
| $\delta$ | la densité de l'air à 0° et sous la pression de 760 millimètres; |
| $\alpha$ | le coefficient de dilatation de l'air pour une force élastique initiale H—h. |

Le poids de l'air contenu dans le thermomètre a pour expression :

$$\left(\mathrm{V} + \frac{v}{1+\alpha t} + \frac{v'}{1+\alpha t'}\right)\delta \times \frac{\mathrm{H}-h}{760}.$$

Le ballon A étant placé dans la chaudière ou dans tout autre milieu dont on veut évaluer la température, appelant :

| | |
|---|---|
| $x$ | la température à déterminer; |
| $k$ | le coefficient de dilatation du verre du ballon A; |
| H′ | la pression barométrique au moment où se termine l'expérience, H′ ne peu différer de H que de très-peu; |

$h'$ la différence de niveau du mercure dans les deux branches du manomètre;

$H' \pm h'$ la force élastique du gaz dans l'appareil. Le niveau du mercure devant être maintenu en $f$ dans le tube $bd$, ce que l'on fait en introduisant du mercure dans le manomètre, $h'$ s'ajoute à H' ou s'en retranche suivant que le niveau du mercure est au-dessus ou au-dessous du repère $f$ dans le tube $cd$.

Le poids de l'air contenu dans l'appareil prend alors pour expression

$$\left(V\frac{1+kx}{1+\alpha x}+\frac{v}{1+\alpha t}+\frac{v'}{1+\alpha t'}\right)\delta\times\frac{H'\pm h'}{760}.$$

Le poids de l'air de l'appareil n'ayant évidemment pas changé, on a

$$\left(V+\frac{v}{1+\alpha t}+\frac{v'}{1+\alpha t'}\right)(H-h)=\left(V\frac{1+kx}{1+\alpha x}+\frac{v}{1+\alpha t}+\frac{v'}{1+\alpha t'}\right)(H'\pm h').$$

Équation de laquelle on tire $x$.

Quand l'air est introduit à la pression atmosphérique H dans l'appareil, on fait $h=0$, et on remplace $\pm h'$ par $+h'$ dans les expressions et la formule précédentes.

On conçoit qu'un second thermomètre à gaz, placé à côté du premier dans des conditions identiques, fournirait une formule semblable à la précédente, et donnerait pour $x$ la même valeur que celle-ci, si les deux thermomètres sont comparables. C'est en opérant ainsi que M. Regnault a reconnu :

1° Que l'air atmosphérique suit la même loi de dilatation depuis 0° jusqu'à 300°, lors même que sa force élastique initiale à 0° varie depuis $0^m,400$ jusqu'à $1^m,300$; d'où il résulte que dans la construction d'un thermomètre à air, on n'aura pas à se préoccuper de la densité de l'air introduit; *les instruments seront comparables quelle que soit cette densité.*

2° L'air atmosphérique, l'hydrogène et l'acide carbonique possèdent, entre 0° et 350°, sensiblement la même loi de dilatation, bien que leurs coefficients de dilatation soient notablement différents. Ainsi des thermomètres construits avec ces différents gaz marcheront d'accord, pourvu que l'on calcule les températures avec le coefficient propre à chacun d'eux. Il résulte de là que les coefficients de dilatation de ces gaz présentent sensiblement le même rapport à toutes les températures.

3° Le gaz acide sulfureux s'écarte notablement de la loi de dilatation que présentent les gaz précédents. Le coefficient de dilatation de l'acide sulfureux diminue avec la température prise sur le thermomètre à air; c'est ce que fait voir le tableau suivant, qui donne le coefficient moyen de dilatation par degré centigrade :

| | | |
|---|---|---|
| de | 0° à 98°,12. . . . . | 0,0038251 |
| | *id.* 102°,45. . . . . | 0,0038225 |
| | *id.* 185°,42. . . . . | 0,0037999 |
| | *id.* 257°,17. . . . . | 0,0037923 |
| | *id.* 299°,90. . . . . | 0,0037913 |
| | *id.* 310°,31. . . . . | 0.0037893 |

Il est évident que la variation du coefficient de dilatation réel est encore plus considérable que ne l'indique le tableau, qui donne les coefficients moyens toujours à partir de 0°.

Lorsqu'on n'a qu'une température à déterminer, on peut opérer ainsi qu'il suit avec le thermomètre à air.

On munit la tubulure $g$, *fig.* 62, d'un robinet semblable au robinet $r$. Établissant la communication de $bg$ avec $gh$, on remplit le manomètre de mercure jusqu'au point $g$ ; on intercepte cette communication, puis on établit la communication du ballon A avec $gh$, et on remplit ce ballon d'air sec. Cela fait, on place le ballon dans l'enceinte, de manière qu'une très-petite portion de son tube capillaire, qui peut être droit suivant les circonstances, sorte de l'enceinte; on laisse libre la communication du ballon avec le tube desséchant. Au moment où l'on veut déterminer la température, on supprime toute communication de $gh$ avec A et le manomètre, et on observe le baromètre qui donne la pression atmosphérique à cet instant. On retire l'appareil et on le laisse revenir à la température ambiante.

On enveloppe le réservoir A et son tube capillaire de glace fondante, puis on fait couler le mercure du manomètre, de façon à avoir dans le tube $df$ une dépression de 6 à 7 décimètres au-dessous du niveau $ab$; on établit alors la communication entre le ballon A et le manomètre, une portion de l'air du ballon A passe dans le tube $df$. On verse du mercure dans le tube $cd$ pour amener exactement le niveau au repère $f$ marqué sur le tube $bd$. On mesure la différence des colonnes de mercure du manomètre, et l'on observe de nouveau la hauteur du baromètre.

Appelant :

| | |
|---|---|
| V | la capacité du ballon et de son tube capillaire jusqu'à $g$ à 0° ; |
| H | la hauteur barométrique au moment de la fermeture du robinet $g$ ; |
| T | la température de l'enceinte et du réservoir au moment de la fermeture du robinet $g$; |
| $v$ | la capacité du tube capillaire $gbf$; |
| $h$ | la différence de hauteur des deux colonnes du manomètre quand l'air de l'appareil est ramené à 0° ; |
| H' | la hauteur du baromètre à cet instant ; |
| $t$ | la température marquée par un thermomètre dans le voisinage du tube $gbf$; |
| $k$ et $\alpha$ | les coefficients de dilatation de l'enveloppe et du gaz. |

Le poids de l'air contenu dans l'appareil a pour expression, quand on ferme le robinet $g$ :

$$V\frac{1+kT}{1+\alpha T}\times\delta\times\frac{H}{760}.$$

Ce poids, quand l'appareil est à 0°, a pour expression

$$\left(V+v\frac{1}{1+\alpha t}\right)\delta\times\frac{H'-h}{760}.$$

On a donc, en égalant ces deux poids, supprimant les facteurs communs et divisant par V :

$$\frac{1+kT}{1+\alpha T}H=\left(1+\frac{v}{V}\times\frac{1}{1+\alpha t}\right)(H'-h).$$

Équation qui donne la valeur de T.

L'avantage principal de cette manière d'opérer consiste en ce que le réservoir éprouve toujours la même pression sur ses parois intérieure et extérieure pendant qu'il est échauffé, et qu'il n'y a pas de déformation permanente à craindre tant que l'on n'atteindra pas la température à laquelle le verre commence à se ramollir.

**234.** *Pyromètre à air* (256). La disposition précédente est aussi très-convenable pour un pyromètre à air. Le ballon de verre A est remplacé dans ce cas par une boule en platine d'une aussi grande capacité que possible, sur laquelle on a soudé à l'or un tube capillaire en platine; que l'on pourra fabriquer en étirant à la filière un tube d'un diamètre plus grand rempli de plomb ou d'étain. Quand le tube est étiré, on fait fondre le plomb ou l'étain, dont on facilite l'écoulement avec un petit fil de fer. On achève le nettoyage du tube avec un acide.

La sensibilité de l'appareil sera moins grande dans les hautes que dans les basses températures; mais elle sera toujours suffisante, parce que la mesure des forces élastiques du gaz comporte une grande précision.

Suivant que l'appareil aura été porté à la température de

60, 1000, 1500, 2000°,

à 0°, la force élastique en millim. sera respectivement :

237, 163, 117, 91.

La plus grande cause d'incertitude provient de ce que l'on ne connaît pas la loi de la dilatation de l'enveloppe, c'est-à-dire les valeurs de $k$ à ces hautes températures; mais cette cause ne peut jamais amener d'erreurs bien considérables.

Il convient, toutes les fois que cela est possible, de disposer le thermomètre à air de manière à ce qu'on puisse déterminer directement, par l'expérience, les forces élastiques à 0° et à 100°, le réservoir étant plongé dans la glace fondante ou maintenu dans la vapeur de l'eau bouillante. Mais il arrivera souvent que la détermination directe des deux points fixes de l'échelle thermométrique sera impossible, lorsque, par exemple, le thermomètre est disposé dans des vases où il est difficile de pénétrer; on est alors obligé de prendre le point de départ du thermomètre à air à la température du milieu ambiant prise sur un thermomètre à mercure, et de déduire ensuite par le calcul les élé-

ments qui conviennent à l'appareil pour la température de la glace fondante.

Si le thermomètre renferme de l'air ayant une force élastique de 760 millim. à 0°, aux températures plus élevées :

100°, 200°, 300°, 350°, 400°, 500°, 600°, 700°, 800°,

il présentera les forces élastiques respectives :

1036, 1311, 1584, 1720, 1856, 2126, 2394, 2661, 2925 millim.

Si la température ne dépasse pas 350°, la force élasitque de l'air intérieur ne deviendra pas plus grande que 1720 millim. ; la pression effective, sur les parois, ne dépassera pas 1720 — 760 = 960 millim. ; elle sera donc trop faible pour qu'il y ait à craindre une déformation permanente de l'enveloppe. Mais dans les températures plus élevées, on a à craindre une déformation permanente pour deux raisons :

1° La pression intérieure devient considérable ;

2° Le verre peut éprouver un ramollissement sensible.

Il convient donc d'introduire dans le thermomètre de l'air avec une force élastique plus faible, lorsque le thermomètre est destiné à la mesure de températures très-élevées. Si l'air présentait à 0° une force élastique de 300 millim., il acquerrait à 500° une force élastique de 850 millim., qui ne surpasse la pression extérieure que de 90 millim.

**255.** *Thermomètre à mercure.* Ce thermomètre n'étant pas un instrument comparable au delà des températures qui ont servi à déterminer les points fixes de son échelle, il est clair que l'on ne devra pas s'en servir, dans des expériences précises, pour mesurer des températures élevées, et qu'il faudra avoir recours au thermomètre à air (253). Mais l'emploi de ce dernier appareil est beaucoup plus difficile ; il exige des manipulations très-délicates, et il peut se présenter des circonstances dans lesquelles le thermomètre à air devient complétement inapplicable : telle est, par exemple, celle où l'on aura à déterminer des températures dans des espaces très-rétrécis ; il faudra alors se servir nécessairement d'un thermomètre à mercure ; mais il conviendra de faire préalablement une comparaison directe de cet instrument avec un thermomètre à air.

En opérant comme pour des thermomètres de gaz différents (P. 321), M. Regnault a comparé au thermomètre à air des thermomètres à mercure faits avec différents verres ; le tableau suivant contient les résultats qu'il a obtenus.

| TEMPÉRATURES du thermomètre à air. | TEMPÉRATURES DU THERMOMÈTRE A MERCURE. | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Cristal de Choisy-le-Roi. | Verre ordinaire à tubes, ballons et cornues. | Verre vert peu fusible. | Verre de Suède très-infusible. |
| ° | ° | ° | ° | ° |
| 100 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 110 | 110.05 | 109.98 | 110.03 | 110.02 |
| 120 | 120.12 | 119.95 | 120.08 | 120.04 |
| 130 | 130.20 | 129.91 | 130.14 | 130.07 |
| 140 | 140.29 | 139.85 | 140.21 | 140.11 |
| 150 | 150.40 | 149.80 | 150.30 | 150.15 |
| 160 | 160.52 | 159.74 | 160.40 | 160.20 |
| 170 | 170.65 | 169.68 | 170.50 | 170.26 |
| 180 | 180.80 | 179.63 | 180.60 | 180.33 |
| 190 | 191.01 | 189.65 | 190.70 | 190.41 |
| 200 | 201.25 | 199.70 | 200.80 | 200 50 |
| 210 | 211.53 | 209.75 | 211.00 | 210.61 |
| 220 | 221.82 | 219.80 | 221.20 | 220.75 |
| 230 | 232.16 | 229.85 | 231.42 | 230.90 |
| 240 | 242.55 | 239.90 | 241.60 | 241.16 |
| 250 | 253.00 | 250.05 | 251.85 | 251.44 |
| 260 | 263.44 | 260.20 | 262.15 | |
| 270 | 273.90 | 270.38 | 272.50 | |
| 280 | 284.48 | 280.52 | 282.85 | |
| 290 | 295.10 | 290.80 | 293.30 | |
| 300 | 305.72 | 301.08 | | |
| 310 | 316.45 | 311.45 | | |
| 320 | 327.25 | 321.80 | | |
| 330 | 338.22 | 332.40 | | |
| 340 | 349.30 | 343.00 | | |
| 350 | 360.50 | 354.00 | | |
| Compositions chimiques moyennes des enveloppes de ces thermomètres à mercure, densités de ces enveloppes, dilatation $k$ de ces enveloppes quand on porte leur température de 0° à 100°, et dilatation apparente $k'$ du mercure qu'elles contiennent pour la même élévation de température. | | | | |
| Silice. . . . . | 54.16 | 70.48 | 68.58 | 71.37 |
| Alumine. . . . | 0.52 | 0.46 | 1.23 | 0.33 |
| Oxyde de fer. . | » | 0.28 | 1.84 | Traces. |
| Oxyde de manganèse.. . . | » | 0.19 | 0.46 | *id.* |
| Chaux. . . . . | 0.36 | 8.75 | 14.07 | 9.36 |
| Potasse. . . . | 9.23 | 2.14 | 2.00 | 17.23 |
| Soude. . . . . | 0.90 | 17.20 | 12.00 | 1.79 |
| Magnésie.. . . | » | » | » | Traces. |
| Oxyde de plomb | 34.62 | » | » | » |
| | 99.79 | 99.50 | 100.18 | 100.08 |
| Densités. . . . | 3.304 | 2.455 | 2.481 | 2.410 |
| $k =$ | 0.002 144 | 0.002 686 | 0.002 324 | 0.002 492 |
| $k' =$ | 0.015 974 | 0.015 426 | 0.015 789 | 0.015 621 |

M. Regnault a posé la formule d'interpolation à deux termes suivante, pour établir *la relation qui existe entre la dilatation cubique du verre et*

*sa température*. Cette formule ne représente pas ses observations d'une manière satisfaisante ; mais elle suffit cependant lorsqu'on se propose seulement de calculer les tables de dilatation du verre, qui sont nécessaires pour corriger les thermomètres à air des dilatations de leurs enveloppes.

Cette formule est :

$$k_T = a + bT + cT^2.$$

$k_T$ dilatation cubique du verre de 0° à T° ;
T température indiquée par le thermomètre à air ;
$a = 0$ pour le cristal de Choisy-le-Roi, et $a = 0$ pour le verre ordinaire ;
$\log b = \overline{4},1957769$ *id.* et $\log b = \overline{5},4171928$ *id.*
$\log c = \overline{8},2580666$ *id.* et $\log c = \overline{8},1691500$ *id.*

C'est à l'aide de cette formule que M. Regnault a calculé le tableau suivant, pour le cristal de Choisy-le-Roi et le verre ordinaire en tubes, seules qualités de verre qu'il ait employées à la construction des thermomètres à air.

Comme les dilatations absolues du mercure croissent à peu près proportionnellement aux températures, les résultats obtenus par M. Regnault se trouvent représentés d'une manière satisfaisante par la formule d'interpolation à deux termes

$$\delta_T = bT + cT^2,$$

dont les constantes ont été calculées avec les données suivantes :

$$T = 150°, \quad \delta_T = 0,027419, \quad \text{et} \quad T = 300°, \quad \delta_T = 0,055973.$$

$\delta_T$ dilatation absolue du mercure quand on porte sa température de 0° à T°, en admettant la valeur de $k_T$ du tableau suivant ;
T température indiquée par le thermomètre à air ;
$\log b = \overline{4},2528690$, $\log c = \overline{8},4019441$.

C'est à l'aide de cette dernière formule que l'on a calculé les dilatations $\delta_T$ du tableau suivant.

La cinquième colonne du tableau donne les coefficients réels de dilatation absolue du mercure, lorsqu'il passe de la température T à celle immédiatement supérieure $T + dT$. Ces coefficients, qui représentent les inclinaisons de la tangente en chaque point de la courbe ayant les valeurs de T pour abscisses et celles de $\delta_T$ pour ordonnées, sont donnés par la relation

$$\frac{d\delta_T}{dT} = b + 2cT.$$

La sixième colonne du tableau contient la température $\theta$ que marquerait un thermomètre qui serait fondé sur la dilatation absolue du mercure. Ces températures sont données par la formule

$$\theta = 100 \times \frac{\delta_T}{\delta_{100}} = 100 \frac{\delta_T}{0,018153}.$$

| TEMPÉRATURE du therm. à air. T | DILATATION CUBIQUE $k_T$ de 0° à T°. Cristal de Choisy-le-Roy. | DILATATION CUBIQUE $k_T$ de 0° à T°. Verre ordinaire. | DILATATION absolue du mercure de 0° à T°. $\delta_T$. | COEFFICIENT réel de dilatation à T°. $\frac{d\delta_T}{dT}$ | TEMPÉRATURE déduite de la dilatation absolue du mercure. θ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0° | 0.000 000 | 0.000 000 0 | 0.000 000 | 0.000 179 05 | 0° |
| 10 | 0.000 227 | 0.000 262 8 | 0.001 792 | 179 50 | 9.872 |
| 20 | 454 | 528 5 | 3 590 | 180 01 | 19.776 |
| 30 | 681 | 797 3 | 5 393 | 180 51 | 29.709 |
| 40 | 909 | 0.001 068 9 | 7 201 | 181 02 | 39.668 |
| 50 | 0.001 137 | 1 343 5 | 9 013 | 181 52 | 49.650 |
| 60 | 1 368 | 1 621 1 | 0.010 831 | 182 03 | 59.665 |
| 70 | 1 594 | 1 901 6 | 12 655 | 182 53 | 69.713 |
| 80 | 1 825 | 2 185 1 | 14 482 | 183 04 | 79.777 |
| 90 | 2 054 | 2 471 6 | 16 315 | 183 54 | 89.875 |
| 100 | 0.002 284 | 0.002 760 9 | 0.018 153 | 0.000 184 05 | 100 » |
| 110 | 2 516 | 3 053 2 | 19 996 | 184 55 | 110.153 |
| 120 | 2 747 | 3 348 6 | 21 844 | 185 05 | 120.333 |
| 130 | 2 980 | 3 646 8 | 23 697 | 185 56 | 130.540 |
| 140 | 3 212 | 3 947 9 | 25 555 | 186 06 | 140.776 |
| 150 | 3 445 | 4 252 5 | 27 419 | 186 57 | 151.044 |
| 160 | 3 678 | 4 560 0 | 29 287 | 187 07 | 161.334 |
| 170 | 3 912 | 4 870 5 | 31 160 | 187 58 | 171.652 |
| 180 | 4 146 | 5 182 2 | 33 039 | 188 08 | 182.003 |
| 190 | 4 380 | 5 496 7 | 34 922 | 188 59 | 192.376 |
| 200 | 0.004 616 | 0.005 817 1 | 0.036 811 | 0.000 189 09 | 202.782 |
| 210 | 4 851 | 6 138 3 | 38 704 | 189 59 | 213.210 |
| 220 | 5 088 | 6 463 6 | 40 603 | 190 10 | 223.671 |
| 230 | 5 325 | 6 791 9 | 42 506 | 190 61 | 234.154 |
| 240 | 5 561 | 7 123 2 | 44 415 | 191 11 | 244.670 |
| 250 | 5 799 | 7 455 9 | 46 329 | 191 61 | 255.214 |
| 260 | 6 037 | 7 792 2 | 48 247 | 192 12 | 265.780 |
| 270 | 6 275 | 8 132 4 | 50 171 | 192 62 | 276.379 |
| 280 | 6 514 | 8 475 6 | 52 100 | 193 13 | 287.005 |
| 290 | 6 753 | 8 821 8 | 54 034 | 193 63 | 297.659 |
| 300 | 0.006 994 | 0.009 168 6 | 0.055 973 | 0.000 194 13 | 308.340 |
| 310 | 7 234 | 9 520 1 | 57 917 | 194 64 | 319.048 |
| 320 | 7 474 | 9 875 2 | 59 866 | 195 15 | 329.786 |
| 330 | 7 716 | 0.010 233 3 | 61 820 | 195 65 | 340.550 |
| 340 | 7 958 | 10 594 4 | 63 778 | 196 16 | 351.336 |
| 350 | 8 199 | 10 958 5 | 65 743 | 196 66 | 362.160 |

Si l'on voulait avoir la dilatation moyenne pour 1°, de 0° à T°, il suffirait de diviser le nombre d'une des colonnes deux, trois, quatre, correspondant à T°, par T; ainsi, par exemple, le coefficient moyen de dilatation du cristal de Choisy-le-Roi, entre 0° et T = 200° est

$$\frac{0{,}004\,616}{200} = 0{,}000\,023\,08.$$

256. *Pyromètre de Wedgwood* (254). Cet instrument, fondé sur le retrait qu'éprouve un cône d'argile lorsqu'on le soumet à une température élevée, sert à évaluer les hautes températures. Le 0° de cet instrument correspond à la température de 580°,56 centigrades; c'est la

température du rouge naissant, à laquelle on fait recuire les cônes d'argile. L'échelle porte ensuite 240 divisions qu'on suppose équivaloir chacune à 72°,22 centigrades. L'échelle est placée sur une règle accompagnée d'une autre faisant avec la première un certain angle ; de sorte qu'en faisant glisser entre ces deux règles le cône d'argile, qui a été placé pendant un temps convenable dans le milieu dont on veut mesurer la température pour prendre lui-même cette température, le point de l'échelle où il s'arrête indique la température cherchée. Le retrait de l'argile pouvant ne pas être proportionnel à la température, on ne doit regarder les indications du pyromètre que comme des valeurs approchées. Cet instrument est surtout utile pour reconnaître les variations de température.

**257.** *TABLEAU de la température de fusion de quelques corps.*

| DÉSIGNATION DES CORPS. | TEMPÉRATURE en degrés centigr. | DÉSIGNATION DES CORPS. | TEMPÉRATURE en degrés centigr. |
|---|---|---|---|
| Mercure | —40° | Alliage de étain 1 part., plomb 1 | 241 |
| Essence de térébenthine | —10 | Alliage de *id.* 1, *id.* 3 | 289 |
| Glace | 0 | Alliage de *id.* 2, *id.* 1 | 196 |
| Suif | 33.33 | Alliage de *id.* 3, *id.* 1 | 186 |
| Phosphore | 43 | Alliage de *id.* 4, *id.* 1 | 189 |
| Acide acétique | 45 | Alliage de *id.* 5, *id.* 1 | 194 |
| Stéarine | 43 à 49 | Étain | 235 |
| Spermacéti | 49 | Bismuth | 270 |
| Acide margarique | 55 à 60 | Plomb | 332 |
| Potassium | 58 | Zinc | 423 |
| Cire non blanchie | 62 | Antimoine | 432 |
| Cire blanche | 68 | Bronze | 900 |
| Acide stéarique | 70 | Argent très-pur | 1000 |
| Sodium | 90 | Or au titre des monnaies | 1180 |
| Alliage de plomb 1 part., étain 1, bismuth 4 | 94 | Or très-pur | 1250 |
| Alliage de *id.* 5, *id.* 3, *id.* 8 | 100 | Fonte blanche très-fusible | 1050 |
| Alliage de *id.* 2, *id.* 3, *id.* 5 | 100 | Fonte blanche peu fusible | 1100 |
| Iode | 107 | Fonte grise très-fusible | 1100 |
| Soufre | 115 | Fonte grise, 2e fusion | 1200 |
| Alliage de étain 4 part., bismuth 5, plomb 1 | 118.9 | Fonte manganésée | 1250 |
| Alliage de *id.* 1, *id.* 1 | 141.2 | Aciers, les plus fusibles | 1300 |
| Alliage de *id.* 2, *id.* 1 | 167.7 | Aciers, les moins fusibles | 1400 |
| Alliage de *id.* 3, plomb 1 | 167.7 | Fer doux français | 1500 |
| Alliage de *id.* 3, bismuth 1 | 200 | Fer martelé anglais | 1600 |

258. Une lame de fer parfaitement décapée, chauffée lentement au contact de l'air, prend les teintes suivantes :

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1° Blanc de fer froid à environ. | 12° | 4° Rouge à. . . . | 265° | 7° Bleu à. . . . | 293° |
| 2° Jaune à. . . . . | 225° | 5° Violet à. . . . | 277° | 8° Vert à. . . . | 332° |
| 3° Orangé à. . . . . | 243° | 6° Indigo à. . . . | 288° | 9° Gris d'oxyde à. | 400° |

*TABLEAU des températures correspondant à différentes nuances lumineuses, d'après les expériences de M. Pouillet, à l'aide d'un pyromètre à air* (page 348).

| NUANCES. | TEMPÉRATURES en degrés centigr. | NUANCES. | TEMPÉRATURES en degrés centigr. |
|---|---|---|---|
| Rouge naissant. . . . . | 525 | Orange foncé. . . . . | 1100 |
| Rouge sombre.. . . . . | 700 | Orange clair . . . . . | 1200 |
| Cerise naissant. . . . . | 800 | Blanc. . . . . | 1300 |
| Cerise.. . . . . | 900 | Blanc suant. . . . . | 1400 |
| Cerise clair. . . . . | 1000 | Blanc éblouissant. . . . | 1500 |

## DILATATION.

**259.** *Dilatation des solides par la chaleur.* Tous les corps jouissent de la propriété de se dilater par la chaleur, mais à des degrés différents.

*TABLEAU de la dilatation linéaire, c'est-à-dire de l'accroissement de chacune des dimensions, longueur, largeur et épaisseur des corps solides, quand on porte la température de ces corps de 0° à 100°, en prenant pour unité la dimension choisie à 0°.* La dilatation moyenne pour 1° s'obtiendrait en divisant par 100 les nombres du tableau.

| DÉSIGNATION DES MATIÈRES. | DILATATIONS EN FRACTIONS décimales. | DILATATIONS EN FRACTIONS ordinaires. |
|---|---|---|
| 1° D'APRÈS LAVOISIER ET LAPLACE. | | |
| Flint-glass anglais. . . . . | 0.000 811 66 | 1/1248 |
| Platine (selon Borda).. . . . . | 0.000 856 55 | 1/1467 |
| Verre de France avec plomb. . . . . | 0.000 871 99 | 1/1147 |
| Tube de verre sans plomb. . . . . | 0.000 875 72 | 1/1142 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 896 94 | 1/1115 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 897 60 | 1/1114 |
| *Id.* . . . . . | 0.000 917 50 | 1/1090 |
| Verre de Saint-Gobain. . . . . | 0.000 890 89 | 1/1122 |
| Acier non trempé. . . . . | 0.001 078 80 | 1/927 |
| *Id.* . . . . . | 0.001 079 15 | 1/927 |
| *Id.* . . . . . | 0.001 079 60 | 1/926 |
| Acier trempé jaune, recuit à 65°. . . . . | 0.001 239 56 | 1/807 |
| Fer doux forgé. . . . . | 0.001 220 45 | 1/819 |
| Fer rond passé à la filière . . . . . | 0.001 235 04 | 1/812 |
| Or de départ.. . . . . | 0.001 466 06 | 1/682 |
| Or au titre de Paris, recuit. . . . . | 0.001 513 61 | 1/661 |
| *Id.* non recuit. . . . . | 0.001 551 55 | 1/645 |
| Cuivre.. . . . . | 0.001 712 20 | 1/584 |
| *Id.* . . . . . | 0.001 717 33 | 1/582 |
| *Id.* . . . . . | 0.001 722 40 | 1/581 |

| DÉSIGNATION DES MATIÈRES. | DILATATIONS EN FRACTIONS décimales. | DILATATIONS EN FRACTIONS ordinaires. |
|---|---|---|
| Cuivre jaune ou laiton | 0.001 866 70 | 1/535 |
| *Id.* | 0.001 878 21 | 1/533 |
| *Id.* | 0.001 889 70 | 1/529 |
| Argent au titre de Paris | 0.001 908 68 | 1/524 |
| Argent de coupelle | 0.001 909 74 | 1/524 |
| Étain des Indes ou de Malacca | 0.001 937 65 | 1/516 |
| Étain de Falmouth | 0.002 172 98 | 1/462 |
| Plomb | 0.002 848 36 | 1/351 |
| **2° D'APRÈS SMEATON.** | | |
| Verre blanc (tubes de baromètres) | 0.000 833 33 | 1/1175 |
| Régule martial d'antimoine | 0.001 083 33 | 1/923 |
| Acier | 0.001 150 00 | 1/870 |
| Acier trempé | 0.001 225 00 | 1/816 |
| Fer | 0.001 258 33 | 1/795 |
| Bismuth | 0.001 391 67 | 1/719 |
| Cuivre rouge battu | 0.001 700 00 | 1/588 |
| Cuivre rouge 8 parties, étain 1 partie | 0.001 816 67 | 1/550 |
| Cuivre jaune fondu | 0.001 875 00 | 1/533 |
| Cuivre jaune 16 parties, étain 1 partie | 0.001 908 33 | 1/524 |
| Fil de laiton | 0.001 933 33 | 1/517 |
| Métal de miroir de télescope | 0.001 933 33 | 1/517 |
| Soudure, cuivre 2 parties, zinc 1 partie | 0.002 058 33 | 1/486 |
| Étain fin | 0.002 283 33 | 1/438 |
| Étain en grains | 0.002 483 33 | 1/403 |
| Soudure blanche, étain 1 partie, plomb 2 parties | 0.002 505 33 | 1/399 |
| Zinc 8 parties, étain 1 partie, un peu forgé | 0.002 691 67 | 1/372 |
| Plomb | 0.002 866 67 | 1/349 |
| Zinc | 0.002 941 67 | 1/340 |
| Zinc allongé au marteau de $\frac{1}{12}$ | 0.003 108 33 | 1/322 |
| **3° D'APRÈS LE MAJOR GÉNÉRAL ROY.** | | |
| Verre en tube | 0.000 775 50 | 1/1289 |
| Verre en verge solide | 0.000 808 33 | 1/1237 |
| Fer fondu (prisme de) | 0.001 110 00 | 1/901 |
| Acier (verge d') | 0.001 144 50 | 1/874 |
| Cuivre jaune de Hambourg | 0.001 855 50 | 1/539 |
| Cuivre jaune anglais, en forme de verge | 0.001 892 96 | 1/528 |
| *Id.* en forme d'auge ou canal rectangulaire | 0.001 894 50 | 1/528 |
| **4° D'APRÈS M. TROUGHTON.** | | |
| Platine | 0.000 991 80 | 1/1008 |
| Acier | 0.001 189 90 | 1/840 |
| Fer tiré à la filière | 0.001 440 10 | 1/694 |
| Cuivre | 0.001 918 80 | 1/521 |
| Argent | 0.002 082 60 | 1/480 |
| **5° D'APRÈS M. WOLLASTON.** | | |
| Palladium | 0.001 000 00 | 1/1000 |

| DÉSIGNATION DES MATIÈRES. | DILATATIONS EN FRACTIONS décimales. | DILATATIONS EN FRACTIONS ordinaires. |
|---|---|---|
| 6° D'APRÈS MM. DULONG ET PETIT. | | |
| Platine, de 0° à 100° | 0.000 884 20 | 1/1131 |
| *Id.* de 0° à 300° | 0.002 754 82 | 1/363 |
| Verre, de 0° à 100° | 0.000 861 33 | 1/1161 |
| *Id.* de 0° à 200° | 0.001 845 02 | 1/544 |
| *Id.* de 0° à 300° | 0.003 032 52 | 1/329 |
| Fer, de 0° à 100° | 0.001 182 10 | 1/846 |
| *Id.* de 0° à 300° | 0.004 405 28 | 1/227 |
| Cuivre, de 0° à 100° | 0.001 718 20 | 1/582 |
| *Id.* de 0° à 300° | 0.005 649 72 | 1/177 |
| 7° D'APRÈS M. FROMENT. | | |
| Platine, un mètre-type | 0.000 749 2 | 1/1335 |

Pour des températures inférieures à 100°, la dilatation est à peu près proportionnelle au nombre de degrés; mais au delà, d'après les expériences de Dulong et Petit, dont les résultats sont consignés au tableau précédent, la dilatation croît sensiblement avec le degré de température.

*La dilatation superficielle d'un solide* est à peu près égale au double de sa dilatation linéaire, c'est-à-dire que si, pour un certain nombre de degrés, la longueur d'un solide augmente de 1/100 de sa longueur à 0°, sa surface augmentera, pour le même nombre de degrés, de 2/100 de sa surface à 0°.

*La dilatation cubique des solides* est à peu près égale au triple de la dilatation linéaire.

**260.** *Dilatation des liquides par la chaleur.*

*TABLEAU de la dilatation apparente de quelques liquides, dans le verre, lorsqu'on élève leur température de 0° à 100°.* La dilatation pour 1° s'obtiendrait en divisant par 100 les nombres du tableau.

| DÉSIGNATION DES LIQUIDES. | DILATATIONS APPARENTES EN fractions décimales. | DILATATIONS APPARENTES EN fractions ordinaires. |
|---|---|---|
| Eau | 0.046 6 | 1/22 |
| Acide chlorhydrique (densité 1.137) | 0.060 0 | 1/17 |
| Acide azotique (densité 1.40) | 0.110 0 | 1/9 |
| Acide sulfurique (densité 1,85) | 0.060 0 | 1/17 |
| Éther sulfurique | 0.070 0 | 1/14 |
| Huile d'olive et de lin | 0.080 0 | 1/12 |

| DÉSIGNATION DES LIQUIDES. | DILATATIONS APPARENTES EN | |
|---|---|---|
| | fractions décimales. | fractions ordinaires. |
| Essence de térébenthine. . . . . | 0.070 0 | 1/14 |
| Eau saturée de sel marin. . . . . | 0.050 0 | 1/20 |
| Alcool. . . . . | 0.110 0 | 1/9 |
| Mercure. . . . . | 0.015 6 | 1/64 |
| DILATATION ABSOLUE. | | |
| Mercure, de 0° à 100° (Dulong et Petit). . . . | 0.018 018 0 | 1/55.50 |
| *Id.* de 100° à 200°. . . . *id.* . . . . . | 0.018 433 1 | 1/54.25 |
| *Id.* de 200° à 300°. . . . *id.* . . . . . | 0.018 867 9 | 1/53 |
| *Id.* de 0° à 100° (M. Regnault). . . . . | 0.018 153 | 1/55.12 |

**261.** *Dilatation des gaz par la chaleur.* D'après les expériences de M. Gay-Lussac, tous les gaz, soumis à une pression constante, se dilatent de la même manière, et de $\frac{1}{267} = 0{,}003\,75$ de leur volume à 0°, par degré centigrade ; mais de nouvelles expériences, faites par M. Rudberg, ont donné 0,003 646, et d'autres, plus récentes encore, faites par M. Regnault, ont donné pour l'air sec 0,003 670, qui diffère peu de 0,003 666..... $= \frac{11}{3000}$, valeur très-commode à employer dans les calculs.

Lorsque l'air conserve le même volume, M. Regnault adopte le coefficient de dilatation 0,003 665.

*TABLEAU de la dilatation absolue de quelques gaz lorsqu'on porte leur température de 0° à 100°, d'après les expériences de M. Regnault.*

| DÉSIGNATION DES GAZ. | DILATATION | |
|---|---|---|
| | sous volume constant. | sous pression constante. |
| Hydrogène. . . . . | 0.3667 | 0.3661 |
| Air atmosphérique. . . . . | 0.3665 | 0.3670 |
| Azote. . . . . | 0.3668 | » |
| Oxyde de carbone. . . . . | 0.3667 | 0.3669 |
| Acide carbonique. . . . . | 0.3688 | 0.3710 |
| Protoxyde d'azote. . . . . | 0.3676 | 0.3719 |
| Acide sulfureux. . . . . | 0.3845 | 0.3903 |
| Cyanogène. . . . . | 0.3829 | 0.3877 |

Ces résultats font voir que les coefficients de dilatation des gaz ne sont pas égaux, comme on l'a admis jusqu'ici.

*TABLEAU de la dilatation de l'air à différentes pressions, sous volume constant.*

| PRESSION à 0°. | PRESSION à 100°. | DENSITÉ de l'air à 0°, en posant = 1, celle de l'air à 0° sous la pression 760 mm. | DILATATION. |
|---|---|---|---|
| mm. | mm. | | |
| 109.72 | 149.01 | 0.1444 | 0.364 82 |
| 174.36 | 237.17 | 0.2294 | 0.365 13 |
| 266.06 | 395.07 | 0.3501 | 0.365 42 |
| 374.67 | 510.35 | 0.4930 | 0.365 87 |
| 375.23 | 510.97 | 0.4937 | 0.365 72 |
| 760.00 | ..... | 1.0000 | 0.366 50 |
| 1678.40 | 2286.09 | 2.2084 | 0.367 60 |
| 1692.53 | 2306.23 | 2.2270 | 0.368 00 |
| 2144.18 | 2924.04 | 2.8213 | 0.368 94 |
| 3655.56 | 4992.09 | 4.8100 | 0.370 91 |

*Résultats analogues fournis par l'acide carbonique.*

| PRESSION à 0°. | PRESSION à 100°. | DENSITÉ relative du gaz à 0°. | DILATATION. |
|---|---|---|---|
| mm. | mm. | | |
| 758.47 | 1034.54 | 1.0000 | 0.368 56 |
| 901.09 | 1230.37 | 1.1879 | 0.369 43 |
| 1742.73 | 2387.72 | 2.2976 | 0.375 23 |
| 3589.07 | 4759.03 | 4.7318 | 0.385 98 |

*Dilatation de quelques gaz à différentes pressions, ces pressions restant constantes.*

| AIR. | | HYDROGÈNE. | | ACIDE CARBONIQUE. | | ACIDE SULFUREUX. | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Pression. | Dilatation. | Pression. | Dilatation. | Pression. | Dilatation. | Pression. | Dilatation. |
| mm. | | mm. | | mm. | | mm. | |
| 760 | 0.367 06 | 760 | 0.366 13 | 760 | 0.370 99 | 760 | 0.390 2 |
| 2525 | 0.369 44 | 2545 | 0.366 16 | 2520 | 0.384 55 | 980 | 0.398 0 |
| 2620 | 0.369 64 | | | | | | |

L'air atmosphérique suit la même loi de dilatation depuis 0° jusqu'à

350°, lors même que sa force élastique initiale à 0° est inférieure à l'atmosphère; on peut donc employer de l'air à une pression inférieure à 0m,76 dans la construction des thermomètres (253, page 321).

262. *Influence de la température sur le volume des gaz.* On a, en supposant que la pression du gaz reste constante :

$$V' = V\frac{1+at'}{1+at}, \quad \text{et pour l'air} \quad V' = V\frac{1+0{,}00367t'}{1+0{,}00367t}.$$

V volume du gaz à la température $t$;
V′ volume que prend le gaz à la nouvelle température $t'$;
$a$ coefficient de dilatation du gaz;
$1+at$ et $1+at'$ volumes que prend l'unité de volume du gaz à 0°, en passant aux températures $t$ et $t'$.

Si la pression du gaz, au lieu de rester constante, avait changé, on aurait, en admettant la loi de Mariotte et en représentant par $p$ la pression primitive, et par $p'$ la pression nouvelle,

$$V' = V\frac{p}{p'}\times\frac{1+at'}{1+at}, \quad \text{et pour l'air} \quad V' = V\frac{p}{p'}\times\frac{1+0{,}00367t'}{1+0{,}00367t}.$$

C'est-à-dire que les volumes d'un même gaz à deux températures et à deux pressions différentes sont entre eux comme les volumes que prend l'unité de volume à 0° en passant aux deux températures, et en raison inverse des pressions. Les densités sont en raison inverse des volumes.

## COMPRESSIBILITÉ.

263. *Compressibilité des gaz.* Mariotte avait posé pour tous les gaz la loi très-simple : *les volumes d'une même quantité de gaz dont la température reste constante varient en raison inverse des pressions* (262).

D'après les dernières expériences de M. Regnault, les gaz ne se comportent pas de la même manière, et ne suivent pas tout à fait cette loi.

M. Regnault a posé les formules suivantes pour représenter les résultats de ses expériences.

Appelant :

$m = \frac{V_o}{V}$ le rapport du volume $V_o$ d'un gaz sous la pression 1m,00 de mercure, au volume V qu'on lui fait prendre;
P la pression en mètres que prend le gaz réduit au volume V;
A et B des constantes,

On a :

1° pour l'air atmosphérique.

$$P = m[1 - A(m-1) + B(m-1)^2],$$

$$\log A = \bar{3},0435120 \quad \text{et} \quad \log B = \bar{5},2873751;$$

2° Pour l'azote,

$$P = m[1 - A(m-1) + B(m-1)^2],$$

$$\log A = \bar{4},838375 \quad \text{et} \quad \log B = \bar{6},8476020;$$

3° Pour l'acide carbonique,

$$P = m[1 - A(m-1) - B(m-1)^2],$$

$$\log A = \bar{3},9310399 \quad \text{et} \quad \log B = \bar{6},8624721;$$

4° Pour l'hydrogène,

$$P = m[1 + A(m-1) + B(m-1)^2],$$

$$\log A = \bar{4},7381736 \quad \text{et} \quad \log B = \bar{6},9250787. \qquad (\textit{Int.}, 377)$$

C'est à l'aide de ces formules qu'ont été calculés les résultats du tableau suivant, qui s'écartent, comme l'on voit, sensiblement de la loi de Mariotte.

| VALEUR de $m$. | Pressions P correspondant aux valeurs de $m$ pour | | | |
|---|---|---|---|---|
| | l'air. | l'azote. | l'acide carbonique. | l'hydrogène. |
| | m. | m. | m. | m. |
| 1 | 1.000 000 | 1.000 000 | 1.000 00 | 1.000 000 |
| 2 | 1.997 828 | 1.998 634 | 1.982 92 | 2.001 110 |
| 3 | 2.993 601 | 2.995 944 | 2.948 73 | 3.003 384 |
| 4 | 3.987 432 | 3.991 972 | 3.897 36 | 4.006 856 |
| 5 | 4.979 440 | 4.986 760 | 4.828 80 | 5.011 645 |
| 6 | 5.969 748 | 5.980 350 | 5.742 96 | 6.017 676 |
| 7 | 6.958 455 | 6.972 791 | 6.639 85 | 7.025 102 |
| 8 | 7.945 696 | 7.964 112 | 7.519 36 | 8.033 944 |
| 9 | 8.931 573 | 8.954 361 | 8.381 52 | 9.044 244 |
| 10 | 9.916 220 | 9.943 590 | 9.226 20 | 10.056 070 |
| 11 | 10.899 724 | 10.931 833 | 10.053 45 | 11.069 454 |
| 12 | 11.882 232 | 11.919 120 | 10.863 24 | 12.084 456 |
| 13 | 12.863 838 | 12.905 516 | 11.655 41 | 13.101 114 |
| 14 | 13.844 670 | 13.891 052 | 12.430 18 | 14.119 504 |
| 15 | 14.824 845 | 14.875 770 | 13.186 95 | 15.139 650 |
| 16 | 15.804 480 | 15.859 712 | 13.926 08 | 16.161 632 |
| 17 | 16.783 675 | 16.942 920 | 14.647 71 | 17.185 470 |
| 18 | 17.762 562 | 17.825 436 | 15.351 48 | 18.211 230 |
| 19 | 18.741 258 | 18.807 321 | 16.037 33 | 19.238 963 |
| 20 | 19.719 880 | 19.788 580 | 16.705 40 | 20.268 720 |

Il convient de ne pas employer les formules précédentes pour des pressions qui dépassent notablement les plus élevées du tableau, limites auxquelles se sont élevées les expériences de M. Regnault.

Désignant par $z_1 - z_0$ la différence de niveau de deux points de l'atmosphère, par $h$ la hauteur observée du baromètre au niveau $z_0$, et par $(h - \Delta h)$ la hauteur que marquerait ce même baromètre au niveau $z_1$, on peut, à cause de la petitesse de la correction, admettre la formule réduite

$$z_1 - z_0 = 18393^m \times \log \frac{h}{h - \Delta h}.$$

En supposant $h$ égal constamment à $0^m,760$, la formule donne les résultats suivants :

| $(z_1 - z_0)$ | $\Delta h$ | $z_1 - z_0$ | $\Delta h$ | $z_1 - z_0$ | $\Delta h$ | $z_1 - z_0$ | $\Delta h$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| mètres. | mm. | mètres. | mm. | mètres. | mm. | mètres. | mm. |
| 1 | 0.095 | 7 | 0.666 | 13 | 1.236 | 19 | 1.806 |
| 2 | 0.190 | 8 | 0.761 | 14 | 1.331 | 20 | 1.901 |
| 3 | 0.285 | 9 | 0.856 | 15 | 1.426 | 21 | 1.997 |
| 4 | 0.380 | 10 | 0.951 | 16 | 1.521 | 22 | 2.092 |
| 5 | 0.475 | 11 | 1.046 | 17 | 1.616 | 23 | 2.187 |
| 6 | 0.571 | 12 | 1.141 | 18 | 1.711 | 24 | 2.282 |
| | | | | | | 25 | 2.375 |

Ces différences de pressions ont été déterminées par M. Regnault dans ses expériences sur la compressibilité des gaz, pour tenir compte de la variation de la pression atmosphérique par suite de la variation du niveau du mercure dans le manomètre.

M. Regnault a aussi déterminé l'influence due à l'augmentation de densité du mercure par suite de sa compressibilité

Appelant :

$\mu = 0.00000463$ le coefficient de compressibilité du mercure sous la pression d'une colonne de mercure de 1 mètre ;

$h$ la hauteur de la colonne de mercure normal, c'est-à-dire de mercure à 0° sous la pression atmosphérique, qui fait équilibre à la colonne $z$,

on a

$$h - z = \frac{\mu}{2}(z - 1{,}52)z :$$

formule qui donne les résultats suivants :

| $z$ | $h-z$ | $z$ | $h-z$ | $z$ | $h-z$ | $z$ | $h-z$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| mètres. | mm. | mètres. | mm. | mètres. | mm. | mètres. | mm. |
| 1 | — 0.0012 | 7 | 0.0886 | 14 | 0.4036 | 21 | 0.9450 |
| 1,52 | 0.0000 | 8 | 0.1198 | 15 | 0.4671 | 22 | 1.0406 |
| 2 | + 0.0024 | 9 | 0.1555 | 16 | 0.5352 | 23 | 1.1413 |
| 3 | 0.0102 | 10 | 0.1959 | 17 | 0.6079 | 24 | 1.2463 |
| 4 | 0.0229 | 11 | 0.2409 | 18 | 0.6853 | 25 | 1.3560 |
| 5 | 0.0402 | 12 | 0.2904 | 19 | 0.7672 | | |
| 6 | 0.0619 | 13 | 0.3448 | 20 | 0.8538 | | |

On voit que ces corrections sont très-faibles, et qu'on peut les négliger dans la pratique.

**264.** *Compressibilité des solides et des liquides.* Poisson, dans ses recherches sur l'élasticité, a posé la formule

$$k = \frac{3a}{2}.$$

$a$ Allongement que subit un cylindre d'une matière quelconque homogène, lorsqu'une de ses bases est fixe et que l'autre est tirée dans le sens de sa longueur par une force égale à P sur chaque unité de surface;

$k$ compression cubique que subit ce même cylindre lorsqu'il est soumis sur toute sa surface à une pression égale à P sur chaque unité de surface.

*TABLEAU des valeurs de* a *d'une tige de* 1 *mètre de longueur, pour une traction égale à une atmosphère, c'est-à-dire pour* $P = 0^k.010298$ *par millimètre de section, et de celles de* k, *calculées d'après la formule précédente.*

| OPÉRATEURS. | MATIÈRES. | VALEURS de $a$. | VALEURS de $k$. |
|---|---|---|---|
| Colladon et Sturm. | Verre. . . . . | 0.000 001 029 8 | 0.000 001 544 7 |
| Savart. | Verre. . . . . | 0.000 001 713 7 | 0.000 002 570 5 |
| | | 0.000 001 700 7 | 0.000 002 551 0 |
| Wertheim et Chevandier. | Verre à vitre de Saint-Quirin. . . | 0.000 001 300 8 | 0.000 001 951 2 |
| | Glace de Cirey. . . . . | 0.000 001 468 0 | 0.000 002 202 0 |
| | Verre à gobeleterie de Valéristhal. | 0.000 001 494 6 | 0.000 002 241 9 |
| | Cristal blanc de Baccarat. . . . . | 0.000 001 882 2 | 0.000 002 823 3 |
| Wertheim. | Cuivre écroui et étiré. . . . . | 0.000 000 828 | 0.000 001 242 |
| | *Id.* *id.* et recuit. . | 0.000 000 980 | 0.000 001 469 |
| | Laiton. . . . . | 0.000 001 013 | 0.000 001 518 |

D'après les expériences de M. Regnault sur la compressibilité des liquides, appelant :

$\delta$ la compressibilité apparente;
$\mu$ et $k$ les compressibilités absolues du liquide et de l'enveloppe, calculées d'après des formules de M. Lamé,

on a en moyenne, pour une pression d'une atmosphère, les valeurs du tableau suivant :

| LIQUIDES. | VALEURS | | |
|---|---|---|---|
| | de $\delta$. | de $\mu$. | de $k$. |
| Eau dans une sphère en cuivre rouge. | 0.000 046 392 | 0.000 047 709 | 0.000 001 317 |
| *Id.* *id.* en laiton. . . . | 0.000 046 847 | 0.000 048 288 | 0.000 001 440 |
| *Id.* dans un cylindre de verre ordin. | 0.000 044 304 | 0.000 046 677 | 0.000 002 368 |
| Mercure dans *id.* . . . . . | 0.000 001 234 | 0.000 003 517 | 0.000 002 374 |

Pour l'eau, la valeur de $\mu$ devant évidemment être la même quelle que soit l'enveloppe, comme les différences trouvées sont trop considérables pour qu'on puisse les attribuer aux erreurs d'observation, il faut admettre, ou que les formules mathématiques ne représentent pas exactement le phénomène, ou bien que les expériences ne réalisent pas convenablement les conditions admises dans l'établissement des formules.

La compressibilité du mercure, sous une charge égale au poids d'une colonne de mercure d'un mètre est

$$\mu' = 0{,}000\,004\,628.$$

M. Regnault a conclu de ses expériences, que la chaleur dégagée par une pression subite de 10 atmosphères sur l'eau est incapable d'élever sa température de 1/50 de degré centigrade.

## CHALEUR SPÉCIFIQUE.

**265.** *Unité de chaleur.* On appelle unité de chaleur, la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un kilogramme d'eau de 0° à 1° (page 342).

**266.** *Chaleur spécifique.* La chaleur spécifique ou capacité calorifique d'un corps est le nombre d'unités de chaleur nécessaire pour élever d'un degré la température d'un kilogramme de ce corps.

*TABLEAU des chaleurs spécifiques de quelques corps, de 0° à 100°,* d'après M. Regnault.

| DÉSIGNATION DES CORPS. | CHALEURS spécifiques. |
|---|---|
| Fer | 0.113 79 |
| Zinc | 0.095 55 |
| Cuivre | 0.095 15 |
| Cadmium | 0.056 69 |
| Argent | 0.055 01 |
| Arsenic | 0.081 40 |
| Plomb | 0.031 40 |
| Bismuth | 0.030 84 |
| Antimoine | 0.050 77 |
| Étain des Indes | 0.056 23 |
| *Id.* anglais | 0.056 95 |
| Nickel | 0.108 63 |
| Cobalt | 0.106 96 |
| Platine laminé | 0.032 43 |
| *Id.* en mousse | 0.032 93 |
| Palladium | 0.059 27 |
| Or | 0.032 44 |
| Soufre | 0.202 59 |
| Iode | 0.054 12 |
| Acier Haussmann | 0.118 48 |
| Fine-métal | 0.127 28 |
| Fonte de fer blanche de Bourgogne | 0.129 83 |
| Charbon | 0.241 11 |
| Phosphore de 10° à 30° | 0.1887 |
| Phosphore de 0° à 100°, avec chaleur de fusion comprise | 0.250 34 |
| | 0.252 50 |
| Manganèse très-carburé | 0.144 11 |
| Mercure | 0.033 32 |
| Verre | 0.197 68 |
| **ALLIAGES ET OXYDES.** | |
| Laiton | 0.093 91 |
| Plomb 1 at., étain 1 at. | 0.040 73 |
| *Id.* 1 at., étain 2 at. | 0.045 06 |
| *Id.* 1 at., antimoine 1 at. | 0.038 80 |
| Bismuth 1 at., étain 1 at. | 0.040 00 |
| *Id.* 1 at., étain 2 at. | 0.045 04 |
| *Id.* 1 at., étain 2 at., et antimoine 1 at. | 0.046 21 |
| Bismuth 1 at., étain 2 at., antimoine 1 at., zinc 2 at. | 0.056 57 |
| Plomb 1 at., étain 2 at., bismuth 1 at. | 0.044 76 |
| Plomb 1 at., étain 2 at., bismuth 2 at. | 0.060 82 |
| Mercure 1 at., étain 1 at. | 0.072 94 |
| *Id.* 1 at., étain 2 at. | 0.065 91 |
| *Id.* 1 at., plomb 1 at. | 0.038 27 |
| Protoxyde de plomb en poudre | 0.051 18 |
| Protoxyde de plomb fondu | 0.050 89 |
| Oxyde de mercure | 0.051 79 |
| Protoxyde de manganèse | 0.157 01 |
| Oxyde de cuivre | 0.142 04 |
| *Id.* de nickel | 0.162 34 |
| *Id.* calciné à la forge | 0.158 85 |
| Magnésie | 0.243 94 |
| Oxyde de zinc | 0.124 80 |
| Peroxyde de fer (fer oligiste) | 0.166 95 |
| Colcothar peu calciné | 0.175 69 |
| Colcothar calciné une deuxième fois | 0.171 67 |
| Colcothar fortement calciné | 0.169 21 |
| Colcothar fortement calciné une deuxième fois | 0.167 07 |
| Acide arsénieux | 0.127 86 |
| Oxyde de chrome | 0.179 60 |
| *Id.* de bismuth | 0.060 53 |
| *Id.* d'antimoine | 0.090 09 |
| Alumine (corindon) | 0.197 62 |
| *Id.* (saphir) | 0.247 32 |
| Acide stannique | 0.093 26 |
| *Id.* titanique artificiel | 0.171 64 |
| *Id.* titanique (rutile) | 0.170 32 |
| *Id.* antimonieux | 0.095 35 |
| *Id.* tungstique | 0.079 83 |
| *Id.* molybdique | 0.132 40 |
| *Id.* silicique | 0.194 32 |
| *Id.* borique | 0.237 43 |
| Oxyde de fer magnétique | 0.167 80 |
| Protosulfure de fer | 0.135 70 |
| Sulfure de nickel | 0.128 43 |
| *Id.* de cobalt | 0.125 12 |
| *Id.* de zinc | 0.123 03 |
| *Id.* de plomb | 0.050 86 |
| *Id.* de mercure | 0.051 17 |
| Protosulfure d'étain | 0.083 65 |
| Sulfure d'antimoine | 0.084 03 |
| *Id.* de bismuth | 0.060 02 |
| Bisulfure de fer (pyrite) | 0.130 09 |
| *Id.* d'étain | 0.119 32 |
| Sulfure de cuivre | 0.121 18 |
| *Id.* d'argent | 0.074 60 |
| Pyrite magnétique | 0.160 23 |
| Chlorure de sodium | 0.214 01 |
| *Id.* de potassium | 0.172 95 |
| Protochlorure de mercure | 0.052 05 |
| *Id.* de cuivre | 0.138 27 |
| Chlorure d'argent | 0.091 09 |
| *Id.* de baryum | 0.089 57 |
| *Id.* de strontium | 0.149 90 |

| DÉSIGNATION DES CORPS. | CHALEURS spécifiques. |
|---|---|
| Chlorure de calcium | 0.164 20 |
| *Id.* de magnésium | 0.194 60 |
| *Id.* de plomb | 0.066 41 |
| Protochlorure de mercure | 0.068 89 |
| Chlorure de zinc | 0.136 18 |
| Perchlorure d'étain | 0.101 61 |
| Chlorure de manganèse | 0.142 55 |
| Chloride d'étain | 0.147 59 |
| Chlorure d'arsenic | 0.176 04 |
| Fluorure de calcium | 0.214 92 |
| Nitrate de potasse | 0.238 75 |
| *Id.* de soude | 0.278 21 |
| *Id.* d'argent | 0.143 52 |
| *Id.* de baryte | 0.152 28 |
| Chlorate de potasse | 0.209 56 |
| Phosphate de potasse | 0.191 02 |
| *Id.* de soude | 0.228 33 |
| *Id.* de plomb ($P^2O^5 + 2RO$) | 0.082 08 |
| *Id.* de plomb ($P^2O^5 + 3RO$) | 0.079 82 |
| Arséniate de potasse | 0.156 31 |
| *Id.* de plomb | 0.072 80 |
| Sulfate de potasse | 0.190 10 |
| *Id.* de soude | 0.231 15 |
| *Id.* de baryte | 0.112 85 |
| *Id.* de strontiane | 0.142 79 |
| *Id.* de plomb | 0.087 23 |
| *Id.* de chaux | 0.196 56 |
| *Id.* de magnésie | 0.221 59 |
| Chromate de potasse | 0.185 05 |
| Bichromate de potasse | 0.189 37 |
| Borate de potasse | 0.219 75 |
| *Id.* de soude | 0.238 23 |

| DÉSIGNATION DES CORPS. | CHALEURS spécifiques. |
|---|---|
| Borate de plomb ($B^2O^6 + RO$) | 0.114 09 |
| *Id.* de potasse | 0.204 78 |
| *Id.* de soude | 0.257 09 |
| *Id.* de plomb ($B^2O^6 + 2RO$) | 0.090 46 |
| Wolfram | 0.097 80 |
| Zircon | 0.145 58 |
| Carbonate de potasse | 0.216 23 |
| *Id.* de soude | 0.272 75 |
| *Id.* de chaux (spath d'Islande) | 0.208 58 |
| Aragonite | 0.208 50 |
| Marbre saccharoïde gris | 0.209 89 |
| *Id.* blanc | 0.215 85 |
| Craie blanche | 0.214 85 |
| Carbonate de baryte | 0.110 38 |
| *Id.* de strontiane | 0.144 83 |
| *Id.* de fer | 0.193 45 |
| *Id.* de plomb | 0.085 96 |
| Dolomie | 0.217 43 |
| Noir animal | 0.260 85 |
| Charbon de bois | 0.241 50 |
| Coke de cannel-coal | 0.203 07 |
| *Id.* de la houille | 0.200 85 |
| Charbon de l'anthracite du pays de Galles | 0.201 72 |
| Charbon de l'anthracite de Philadelphie | 0.201 00 |
| Graphite naturel | 0.201 87 |
| *Id.* des hauts-fourneaux | 0.497 02 |
| *Id.* des cornues à gaz | 0.203 60 |
| Diamant | 0.146 87 |

| DÉSIGNATION DES CORPS. | OPÉRATEURS. | |
|---|---|---|
| Chaux vive | Lavoisier et Laplace. | 0.216 9 |
| Huile d'olive | *Id.* | 0.309 6 |
| Acide sulfurique (densité 1.87) | *Id.* | 0.334 6 |
| Acide azotique (densité 1.30) | *Id.* | 0.661 4 |
| Vinaigre | Dalton. | 0.920 0 |
| Acide chlorhydrique (densité 1.53) | *Id.* | 0.600 |
| Alcool (densité 0.81) | *Id.* | 0.700 |
| *Id.* (densité 0.793) | *Id.* | 0.622 |
| Éther sulfurique (densité 0.76) | *Id.* | 0.660 |
| *Id.* (densité 0.715) | Despretz. | 0.520 |
| Essence de térébenthine (densité 0.872) | *Id.* | 0.472 |
| Bois de pin | Mayer. | 0.650 |
| Bois de chêne | *Id.* | 0.570 |
| Bois de poirier | *Id.* | 0.500 |
| Flint-glass | Dalton. | 0.190 |
| Chlorure de sodium | *Id.* | 0.230 |

| DÉSIGNATION DES CORPS. | OPÉRATEURS. | CHALEURS spécifiques. |
|---|---|---|
| Mercure, de 0° à 100° | Dulong et Petit. | 0.0330 |
| *Id.* de 0 à 300 | *Id.* | 0.0350 |
| Platine, de 0 à 100 | *Id.* | 0.0335 |
| *Id.* de 0 à 300 | *Id.* | 0.0355 |
| Antimoine, de 0 à 100 | *Id.* | 0.0507 |
| *Id.* de 0 à 300 | *Id.* | 0.0547 |
| Argent, de 0 à 100 | *Id.* | 0.0557 |
| *Id.* de 0 à 300 | *Id.* | 0.0611 |
| Zinc, de 0 à 100 | *Id.* | 0.0927 |
| *Id.* de 0 à 300 | *Id.* | 0.1015 |
| Cuivre, de 0 à 100 | *Id.* | 0.0940 |
| *Id.* de 0 à 200 | *Id.* | 0.1013 |
| Fer, de 0 à 100 | *Id.* | 0.1098 |
| *Id.* de 0 à 200 | *Id.* | 0.1150 |
| *Id.* de 0 à 300 | *Id.* | 0.1218 |
| *Id.* de 0 à 350 | *Id.* | 0.1255 |
| Verre, de 0 à 100 | *Id.* | 0.1770 |
| *Id.* de 0 à 300 | *Id.* | 0.1900 |
| Platine, 100° | Pouillet. | 0.03350 |
| *Id.* 300 | *Id.* | 0.03434 |
| *Id.* 500 | *Id.* | 0.03518 |
| *Id.* 700 | *Id.* | 0.03600 |
| *Id.* 1000 | *Id.* | 0.03718 |
| *Id.* 1200 | *Id.* | 0.03818 |

La chaleur spécifique d'un même corps est à peu près constante pour des températures inférieures à 100°; mais au-dessus, elle croît sensiblement avec la température, et surtout au point où le corps commence à se ramollir. La chaleur spécifique d'un même corps diminue à mesure que l'état d'agrégation de ce corps devient plus grand. Cependant Dulong, en comparant les chaleurs spécifiques des corps simples aux poids atomiques de ces mêmes corps, a posé la loi : *Les chaleurs spécifiques des corps simples sont en raison inverse de leurs poids atomiques;* d'où il résulte que les produits des chaleurs spécifiques par les poids atomiques sont un nombre constant; c'est en effet ce que vérifient sensiblement les résultats donnés par l'expérience.

Neumann a posé une loi semblable à la précédente, pour les corps composés; elle est : *Pour chaque classe des corps composés ayant la même composition atomique et de constitution chimique semblable, les chaleurs spécifiques sont en raison inverse des poids atomiques.* Cette loi vient d'être vérifiée par les expériences de M. Regnault, desquelles il résulte aussi que la chaleur spécifique d'un alliage est sensiblement la somme des quantités de chaleur nécessaires pour élever séparément de 1° la température de chaque quantité de métal qui entre dans 1 kil. de l'alliage.

M. Regnault vient de faire des expériences pour déterminer la cha-

leur spécifique de l'eau à différentes températures. A l'aide de ses résultats, il a calculé une formule d'interpolation qui donne le nombre Q d'unités de chaleur absorbées par 1 kilog. d'eau quand on porte sa température de 0° à T°, en appelant *unité de chaleur* la chaleur qu'absorbe 1 kilog. d'eau à 0° pour s'échauffer de 1°.

Cette formule est

$$Q = T + AT^2 + BT^3. \qquad (a)$$

A = 0,00002 et B = 0,0000003 constantes déterminées pour les valeurs d'expérience Q = 100,5 et Q = 203,3, qui correspondent à T = 100° et T = 200°.

La formule précédente revient donc à

$$Q = T + 0,000\,02T^2 + 0,000\,000\,3T^3.$$

La quantité de chaleur que 1 kilog. d'eau absorbe quand sa température passe de T° à (T + 1°), en supposant que pour chaque élément $dT$ de ce degré l'absorption de chaleur soit la même, est donnée par la formule

$$\frac{dQ}{dT} = 1 + 0,000\,04T + 0,000\,000\,9T^2.$$

La quantité $\frac{dQ}{dT}$ est la tangente à la courbe représentée par l'équation (*a*), c'est-à-dire à la courbe dont les abscisses sont aux ordonnées correspondantes dans le rapport de Q à T, au point correspondant à la valeur de T (page 326).

C'est à l'aide de ces deux formules qu'a été calculé le tableau suivant, dont les résultats sont donnés pour les températures de 10° en 10° à partir de 0°.

| TEMPÉRATURE du thermomètre à air T. | VALEUR de Q. | CHALEUR spécifique moyenne de l'eau entre 0° et T°. | CHALEUR SPÉCIFIQUE de l'eau de T° à (T+$dT$)°. $\frac{dQ}{dT}$. |
|---|---|---|---|
| 0° | 0.000 | » | 1.0000 |
| 10 | 10.002 | 1.0002 | 1.0005 |
| 20 | 20.040 | 1.0005 | 1.0012 |
| 30 | 30.026 | 1.0009 | 1.0020 |
| 40 | 40.051 | 1.0013 | 1.0030 |
| 50 | 50.087 | 1.0017 | 1.0042 |
| 60 | 60.137 | 1.0023 | 1.0056 |
| 70 | 70.210 | 1.0030 | 1.0072 |
| 80 | 80.282 | 1.0035 | 1.0089 |
| 90 | 90.381 | 1.0042 | 1.0109 |
| 100 | 100.500 | 1.0050 | 1.0130 |
| 110 | 110.641 | 1.0058 | 1.0153 |
| 120 | 120.806 | 1.0067 | 1.0177 |
| 130 | 130.997 | 1.0076 | 1.0204 |
| 140 | 141.215 | 1.0087 | 1.0232 |
| 150 | 151.462 | 1.0097 | 1.0262 |

| TEMPÉRATURE du thermomètre à air T. | VALEUR de Q. | CHALEUR spécifique moyenne de l'eau entre 0° et T°. | CHALEUR SPÉCIFIQUE de l'eau de T° à (T+dT)°. $\frac{dQ}{dT}$ |
|---|---|---|---|
| 160° | 161.741 | 1.0109 | 1.0294 |
| 170 | 172.052 | 1.0121 | 1.0328 |
| 180 | 182.398 | 1.0133 | 1.0364 |
| 190 | 192.779 | 1.0146 | 1.0401 |
| 200 | 203.200 | 1.0160 | 1.0440 |
| 210 | 213.660 | 1.0174 | 1.0481 |
| 220 | 224.162 | 1.0189 | 1.0524 |
| 230 | 234.708 | 1.0204 | 1.0568 |

**267.** *Chaleur spécifique des gaz.* La chaleur spécifique d'un gaz n'est pas la même, suivant que ce gaz, en changeant de température, peut changer de volume, de manière à rester à une pression constante, ou suivant qu'il conserve le même volume malgré la variation de température, qui change alors sa force élastique.

*TABLEAU des chaleurs spécifiques de quelques gaz sous une même pression constante*, d'après MM. Laroche et Bérard.

| DÉSIGNATION DES GAZ. | CHALEURS SPÉCIFIQUES, celle de l'air étant 1, à volumes égaux. | CHALEURS SPÉCIFIQUES, celle de l'air étant 1, à poids égaux. | CHALEURS spécifiques, celle de l'eau étant 1, à poids égaux. |
|---|---|---|---|
| Air atmosphérique | 1.0000 | 1.0000 | 0.2669 |
| Hydrogène | 0.9033 | 12.5401 | 3.2936 |
| Oxygène | 0.9765 | 0.8848 | 0.2361 |
| Azote | 1.0000 | 1.0348 | 0.2754 |
| Oxyde de carbone | 1.0340 | 1.0805 | 0.2884 |
| Acide carbonique | 1.2588 | 0.8280 | 0.2210 |
| Oxyde d'azote | 1.3503 | 0.8878 | 0.2369 |
| Gaz oléfiant | 1.5530 | 1.5763 | 0.4207 |
| Vapeur d'eau | 1.9600 | 3.1360 | 0.8470 |

*TABLEAU des chaleurs spécifiques de quelques gaz à volume constant, celle de l'air étant égale à 1, et des rapports des chaleurs spécifiques à pression constante aux chaleurs spécifiques à volume constant*, d'après les expériences de Dulong.

| DÉSIGNATION DES GAZ. | CHALEURS spécifiques. | RAPPORTS. |
|---|---|---|
| Air atmosphérique | 1.000 | 1.421 |
| Hydrogène | 1.000 | 1.407 |
| Oxygène | 1.000 | 1.415 |
| Oxyde de carbone | 1.000 | 1.427 |
| Oxyde d'azote | 1.227 | 1.343 |
| Acide carbonique | 1.249 | 1.338 |
| Gaz oléfiant | 1.754 | 1.240 |

Ce tableau fait voir que la chaleur spécifique à volume constant est la même pour les gaz simples, et que de plus elle est égale à celle de l'air; mais qu'elle est différente pour les gaz composés.

### CHALEUR LATENTE.

**268.** *Chaleur latente de liquidité.* Lorsqu'un solide se liquéfie, il absorbe une grande quantité de chaleur sans que sa température augmente; cette quantité de chaleur prend le nom de *calorique de liquidité* ou de *chaleur latente de liquidité.*

*TABLEAU des températures de fusion, et des chaleurs spécifiques, et chaleurs latentes de liquidités de quelques corps, en unités de chaleur* (265), d'après les expériences de M. Person.

| DÉSIGNATION DES CORPS. | TEMPÉRATURE de fusion. | | CHALEUR spécifique à l'état | | CHALEUR latente. |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | liquide. | solide. | |
| 1° *Non métalliques.* | | | | | |
| Eau. . . . . | 0° | | 1.0000 | 0.5040 | 79.25 |
| Phosphore. . . . . | 44.2 | | 0.2045 | 0.1788 | 5.03 |
| Soufre. . . . . | 115.0 | | 0.2340 | 0.2026 | 9.37 |
| Azotate de soude. . . . | 310.5 | | 0.4130 | 0.2782 | 62.98 |
| Azotate de potasse. . . | 339.0 | | 0.3319 | 0.2388 | 47.37 |
| Chlorure de calcium. . | 28.5 | | 0.5550 | 0.3450 | 40.70 |
| Phosphate de soude. . | 36.1 | | 0.7467 | 0.4077 | 66.80 |
| | Thermomètre | | | | |
| 2° *Métalliques.* | à mercure. | à air. | | | |
| | ° | ° | | | |
| Étain. . . . . | 235.0 | 232.7 | 0.0637 | 0.0562 | 14.25 |
| Bismuth. . . . . | 270.5 | 266.8 | 0.0363 | 0.0308 | 12.64 |
| Plomb. . . . . | 334.0 | 326.2 | 0.0402 | 0.0314 | 5.37 |
| Zinc. . . . . | 433.3 | 415.3 | » | 0.0956 | 28.13 |
| Cadmium. . . . . | 328.0 | 320.7 | 0.0642 | 0.0567 | 13.58 |
| Argent. . . . . | » | » | » | 0.0570 | 21.07 |

Les corps, en passant de l'état liquide à l'état solide, dégagent la même quantité de chaleur qu'ils ont absorbée en se liquéfiant, et leur température reste constante tant qu'il y a du liquide à solidifier.

**269.** *Chaleur latente de vaporisation.* Lorsqu'on vaporise un liquide, il absorbe une très-grande quantité de chaleur, et sa température, qui est aussi celle de la vapeur, reste constante tant qu'il y a du liquide à vaporiser; cette quantité de chaleur absorbée prend le nom de *calorique de vaporisation* ou de *chaleur latente de vaporisation.*

*TABLEAU de la chaleur latente de vaporisation de quelques liquides, et de la quantité totale de chaleur absorbée pour amener un kilogramme de ces liquides de 0° à la température d'ébullition et le vaporiser*, d'après M. Despretz.

| DÉSIGNATION DES LIQUIDES. | CHALEUR latente. | CHALEUR totale absorbée, en unités de chaleur. |
|---|---|---|
| Eau | 531 | 631 |
| Alcool | 207 | 255 |
| Éther sulfurique | 96.8 | 109.3 |
| Essence de térébenthine | 76.8 | 149.2 |

Les physiciens ne sont pas d'accord dans l'évaluation de la chaleur latente de vaporisation de l'eau : Rumfort la suppose égale à 557; Dulong, à 543; Clément Desormes, à 550; M. Southern, à 530, et Watt, à 527.

D'après M. Southern, la chaleur latente de vaporisation de l'eau est constante, de sorte que la quantité de chaleur totale contenue dans la vapeur croît avec la température; ainsi un kilogramme de vapeur à 135° contient 530 + 135 unités de chaleur. D'après Clément Desormes, au contraire, la quantité totale de chaleur absorbée pour échauffer et vaporiser un kilogramme d'eau à 0° est toujours de 650 unités, quelle que soit la température de la vapeur; ainsi, à 135°, la chaleur latente de la vapeur est 650 — 135 = 515 unités.

Des expériences faites par M. Pambour tendent à confirmer la loi de Clément Desormes, qui aurait cependant besoin d'être confirmée dans des limites de pression plus étendues, pour qu'on pût la regarder comme générale, ce que l'on supposait cependant dans la pratique.

M. Regnault vient de faire des expériences pour déterminer la chaleur latente de la vapeur d'eau. Ses résultats sont représentés d'une manière satisfaisante par la formule :

$$L = A + BT.$$

L chaleur totale en unités (265), renfermée dans un kilogramme de vapeur saturée à la température T°;

A = 606,5 et B = 0,305 quantités constantes, déterminées pour deux observations où la température T était 100 et 195°.

La formule précédente peut donc s'écrire :

$$L = 606{,}5 + 0{,}305T.$$

Cette formule fait voir que la chaleurt otale renfermée dans un kilogramme de vapeur saturée à T° est égale à la quantité de chaleur qu'un kilogramme de vapeur saturée à 0° abandonne en passant à l'état d'eau liquide à 0°, augmentée du produit 0,305T.

La fraction 0,305 est donc une *capacité calorifique particulière* de la vapeur d'eau, différente des capacités calorifiques des gaz à volume constant, ou à pression constante, mais en relation intime avec ces dernières (267). C'est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à un kilog. de vapeur saturée, pour élever sa température de 1°, lorsque l'on comprime en même temps cette vapeur de manière à la maintenir à l'état de saturation.

C'est à l'aide de cette formule que les chaleurs totales du tableau suivant ont été calculées. De ces chaleurs totales, retranchant les nombres Q d'unités de chaleur absorbées pour porter l'eau de 0° à T° (page 342), on a les chaleurs latentes de vaporisation $l$, consignées dans la dernière colonne de la table.

| TEMPÉRATURE de la vapeur saturée T | CHALEUR totale L | CHALEUR latente $l$. | TEMPÉRATURE de la vapeur saturée T | CHALEUR totale L. | CHALEUR latente $l$. |
|---|---|---|---|---|---|
| 0° | 606.5 | 606.5 | 120° | 643.1 | 522.3 |
| 10 | 609.5 | 599.5 | 130 | 646.1 | 515.1 |
| 20 | 612.6 | 592.6 | 140 | 649.2 | 508.0 |
| 30 | 615.7 | 585.7 | 150 | 652.2 | 500.7 |
| 40 | 618.7 | 578.7 | 160 | 655.3 | 493.6 |
| 50 | 621.7 | 571.6 | 170 | 658.3 | 486.2 |
| 60 | 624.8 | 564.7 | 180 | 661.4 | 479.0 |
| 70 | 627.8 | 557.6 | 190 | 664.4 | 471.6 |
| 80 | 630.9 | 550.6 | 200 | 667.5 | 464.3 |
| 90 | 633.9 | 543.5 | 210 | 670.5 | 456.8 |
| 100 | 637.0 | 536.5 | 220 | 673.6 | 449.4 |
| 110 | 640.0 | 529.4 | 230 | 676.6 | 441.9 |

**270.** *TABLEAU des températures d'ébullition de quelques matières, sous la pression atmosphérique.*

| DÉSIGNATION DES MATIÈRES. | TEMPÉRATURE en degrés centigr. | DÉSIGNATION DES MATIÈRES. | TEMPÉRATURE en degrés centigr. |
|---|---|---|---|
| Eau. . . . . | 100.0 | Diss. sat. de nitre. . . . . | 115.6 |
| Éther sulfurique. . . . . | 37.8 | *Id.* de tartre. . . . . | 116.7 |
| Sulfure de carbone. . . . . | 47.0 | *Id.* de nitrate d'ammon. . | 125.3 |
| Carbure d'hydrogène. . . . . | 225.0 | *Id.* de sous-carbonate de potasse. . . . . | 140.0 |
| Esprit de bois. . . . . | 65.5 | Essence de térébenthine. . . . | 157.0 |
| Alcool. . . . . | 78.4 | Phosphore. . . . . | 290.0 |
| Diss. sat. de sulfate de soude. . | 100.7 | Soufre. . . . . | 299.0 |
| *Id.* d'acétate de plomb. . . | 102.0 | Acide sulfurique. . . . . | 310.0 |
| *Id.* de chlorure de sodium. | 106.9 | Huile de lin. . . . . | 316.0 |
| *Id.* de chlorhydrate d'ammoniaque. . . . . | 114.4 | Mercure. . . . . | 360.0 |

## VAPEURS.

**271.** *Propriétés de la vapeur.* La vapeur non saturée se comporte comme un gaz, quand on fait varier sa température et son volume dans les limites qui ne l'amènent pas à saturation (261 et 262).

La vapeur saturée, c'est-à-dire celle qui est au maximum de tension et de densité correspondant à la température à laquelle elle se trouve, n'étant pas en contact avec du liquide, si on augmente son volume, on diminue sa densité, sa tension et sa température; si au contraire on diminue son volume, on augmente sa densité, sa tension et sa température, et il est probable qu'il y a de la vapeur condensée; cela suppose qu'il n'y a ni gain ni perte de chaleur par l'enveloppe qui renferme la vapeur. D'après Clément Desormes et M. Pambour, il n'y aurait pas condensation, et la vapeur resterait toujours saturée quoiqu'on augmentât ou qu'on diminuât son volume (269).

La vapeur en contact avec le liquide qui la forme est toujours saturée au maximum de densité et de pression correspondant à la température du liquide; il y a vaporisation ou condensation suivant qu'on augmente ou qu'on diminue son volume, et, par suite, absorption ou production de chaleur; ce qui diminue ou augmente la température du liquide, quand, toutefois, il n'y a ni gain ni perte de chaleur par l'enveloppe.

**272.** *Relation entre la température et la force élastique de la vapeur d'eau.* Tredgold a donné une formule empirique qui lie la température à la force élastique de la vapeur d'eau, pour des pressions qui ne dépassent pas une atmosphère, et qui est encore, à part celles de M. Regnault, plus exacte que toute autre pour des pressions comprises entre 1 et 4 atmosphères; cette formule est

$$t = 85\sqrt[6]{p} - 75, \quad \text{d'où} \quad p = \left(\frac{t+75}{85}\right)^6.$$

$t$ température de la vapeur, en degrés centigrades;
$p$ force élastique de la vapeur, en centimètres de mercure.

Avant 1830, on ne connaissait la force élastique de la vapeur que pour des températures ne s'élevant pas au-dessus de 172°.13, ce qui correspond à 8 atmosphères de pression; mais à cette époque, MM. Dulong et Arago poussèrent les expériences jusqu'à la température de 224°.20, qui correspond à une force élastique de 24 atmosphères. Les résultats de ces expériences sont consignés dans le tableau suivant, dont les nombres correspondant à des pressions de plus de 24 atmosphères ont été déterminés au moyen de la formule empirique suivante, que ces savants ont posée pour relier les résultats de leurs expé-

riences. C'est à M. Gay-Lussac que sont dus les résultats correspondant à des températures inférieures à 100°.

$$t = \frac{\sqrt[5]{p} - 1}{0.7153} \quad \text{d'où} \quad p = (1 + 0.7153t)^5.$$

$p$ force élastique de la vapeur, en atmosphères;

$t$ température en unités de 100° centigrades; la valeur de $t$, tirée de la formule, est positive ou négative, suivant que la température de la vapeur est supérieure ou inférieure à 100° : ainsi la température de la vapeur étant 100°, la formule donne $t = 0$; si la température est 140°, on a $t = 0.40$, et si elle est 60°, on a $t = -0.40$.

$t$ exprimant la température en degrés centigrades à partir de 0°, et $p$ la force élastique de la vapeur en kilogrammes par centimètre carré, la formule précédente devient

$$t = 138,883\sqrt[5]{p} - 39,802, \quad \text{d'où} \quad p = (0.28658 + 0.0072003t)^5.$$

*TABLEAU donnant la tension de la vapeur d'eau à différentes températures, sa pression sur un centimètre carré en kilogrammes, sa densité, celle de l'eau étant 1, et le volume de 1 kilogramme de vapeur.*

| TEMPÉRATURE en degrés centigrades. | TENSION en centimètres de mercure. | TENSION en atmosphères. | PRESSION en kilogrammes. | DENSITÉ, celle de l'eau liquide à 0° étant 1. | VOLUME en litres. |
|---|---|---|---|---|---|
| —20° | 0.1333 | » | 0.001 8 | 0.000 001 54 | 650 588 |
| —15 | 0.1879 | » | 0.002 6 | 0.000 002 12 | 470 898 |
| —10 | 0.2631 | » | 0.003 6 | 0.000 002 92 | 342 984 |
| — 5 | 0.3660 | » | 0.005 0 | 0.000 003 98 | 251 358 |
| 0 | 0.5059 | » | 0.006 9 | 0.000 005 40 | 182 323 |
| 5 | 0.6947 | » | 0.009 4 | 0.000 007 27 | 137 488 |
| 10 | 0.9475 | » | 0.012 9 | 0.000 009 74 | 102 670 |
| 12 | 1.0707 | 0.0141 | 0.014 6 | 0.000 010 92 | 91 564 |
| 15 | 1.2837 | » | 0.017 0 | 0.000 012 99 | 77 008 |
| 20 | 1.7314 | » | 0.023 5 | 0.000 017 18 | 58 224 |
| 25 | 2.3090 | » | 0.031 4 | 0.000 022 52 | 44 411 |
| 30 | 3.0643 | » | 0.041 8 | 0.000 029 38 | 34 041 |
| 35 | 4.0404 | » | 0.054 9 | 0.000 038 09 | 26 253 |
| 38 | 4.7579 | 0.0626 | 0.064 6 | 0.000 044 42 | 22 513 |
| 40 | 5.2998 | » | 0.072 0 | 0.000 049 16 | 20 347 |
| 45 | 6.8754 | » | 0.093 40 | 0.000 062 74 | 15 938 |
| 50 | 8.8742 | » | 0.120 56 | 0.000 079 70 | 12 546 |
| 54 | 9.3301 | 0.123 | 0.126 76 | 0.000 083 54 | 11 971 |
| 55 | 11.3710 | » | 0.154 49 | 0.000 100 54 | 9 946 |
| 60 | 14.4660 | » | 0.196 53 | 0.000 125 98 | 7 937 |
| 65 | 18.2710 | » | 0.248 23 | 0.000 156 68 | 6 382 |
| 66 | 19.1270 | 0.252 | 0.259 86 | 0.000 163 56 | 6 114 |
| 70 | 22.9070 | » | 0.311 21 | 0.000 193 55 | 5 167 |
| 75 | 28.507 | » | 0.396 32 | 0.000 237 89 | 4 204 |
| 80 | 35.208 | » | 0.478 34 | 0.000 288 89 | 3 462 |
| 82 | 38.238 | 0.503 | 0.519 50 | 0.000 311 95 | 3 206 |
| 85 | 43.171 | » | 0.586 52 | 0.000 349 16 | 2 864 |
| 90 | 52.528 | » | 0.713 64 | 0 000 418 91 | 2 387 |
| 92 | 56.695 | 0.746 | 0.770 26 | 0.000 449 56 | 2 224 |
| 95 | 63.427 | » | 0.861 72 | 0.000 498 86 | 2 005 |

| TEMPÉRATURE en degrés centigrades. | TENSION en centimètres de mercure. | TENSION en atmosphères. | PRESSION en kilogrammes. | DENSITÉ, celle de l'eau liquide à 0° étant 1. | VOLUME en litres. |
|---|---|---|---|---|---|
| 100° | 76.000 | 1.00 | 1.032 53 | 0.000 589 55 | 1696 |
| 106.60 | 95.000 | 1.25 | 1.290 67 | 0.000 723 91 | 1381 |
| 112.40 | 114.000 | 1.50 | 1.548 80 | 0.000 855 39 | 1169 |
| 117.10 | 133.000 | 1.75 | 1.806 94 | 0.000 983 24 | 1014 |
| 121.55 | 152.000 | 2.00 | 2.065 07 | 0.001 116 52 | 896 |
| 125.50 | 171.000 | 2.25 | 2.323 20 | 0.001 232 93 | 806 |
| 128.85 | 190.000 | 2.50 | 2.581 34 | 0.001 366 36 | 732 |
| 132.15 | 209.000 | 2.75 | 2.839 47 | 0.001 490 56 | 671 |
| 135.00 | 228.000 | 3.00 | 3.097 60 | 0.001 614 53 | 619 |
| 137.70 | 247.000 | 3.25 | 3.355 73 | 0.001 737 39 | 576 |
| 140.35 | 266.000 | 3.50 | 3.613 87 | 0.001 858 86 | 538 |
| 142.70 | 285.000 | 3.75 | 3.872 00 | 0.001 980 20 | 505 |
| 144.95 | 304.000 | 4.00 | 4.130 13 | 0.002 100 67 | 476 |
| 146.76 | 323.000 | 4.25 | 4.388 27 | 0.002 227 31 | 449 |
| 149.15 | 342.000 | 4.50 | 4.646 40 | 0.002 339 38 | 428 |
| 151.15 | 361.000 | 4.75 | 4.904 53 | 0.002 457 63 | 407 |
| 153.30 | 380.000 | 5.00 | 5.162 67 | 0.002 573 63 | 389 |
| 155.00 | 399.000 | 5.25 | 5.420 80 | 0.002 689 56 | 392 |
| 156.70 | 418.000 | 5.50 | 5.678 93 | 0.002 808 27 | 356 |
| 158.30 | 437.000 | 5.75 | 5.937 07 | 0.002 924 85 | 342 |
| 160.00 | 456.000 | 6.00 | 6.195 20 | 0.003 046 51 | 328 |
| 161.54 | 475.000 | 6.25 | 6.453 34 | 0.003 155 13 | 317 |
| 163.25 | 494.000 | 6.50 | 6.711 46 | 0.003 268 28 | 306 |
| 164.84 | 513.000 | 6.75 | 6.969 60 | 0.003 381 48 | 296 |
| 166.42 | 532.000 | 7.00 | 7.227 73 | 0.003 493 93 | 286 |
| 167.94 | 551.000 | 7.25 | 7.485 87 | 0.003 606 06 | 277 |
| 169.41 | 570.000 | 7.50 | 7.744 00 | 0.003 717 83 | 269 |
| 170.78 | 589.000 | 7.75 | 8.002 13 | 0.003 829 07 | 261 |
| 172.13 | 608.000 | 8.00 | 8.260 26 | 0.003 941 10 | 254 |
| 173.46 | 627.000 | 8.25 | 8.518 40 | 0.004 051 98 | 247 |
| 174.79 | 646.000 | 8.50 | 8.776 53 | 0.004 161 23 | 240 |
| 176.11 | 665.000 | 8.75 | 9.034 67 | 0.004 271 82 | 234 |
| 177.40 | 684.000 | 9.00 | 9.292 80 | 0.004 381 11 | 228 |
| 178.68 | 703.000 | 9.25 | 9.550 93 | 0.004 479 55 | 223 |
| 179.89 | 722.000 | 9.50 | 9.809 06 | 0.004 598 73 | 217 |
| 180.95 | 741.000 | 9.75 | 10.067 20 | 0.004 738 58 | 212 |
| 182.00 | 760.000 | 10.00 | 10.325 33 | 0.004 816 90 | 208 |
| 186.03 | 836.000 | 11.00 | 11.357 86 | 0.005 255 7 | 190 |
| 190.00 | 912.000 | 12.00 | 12.390 40 | 0.005 683 4 | 176 |
| 193.70 | 988.000 | 13.00 | 13.422 92 | 0.006 107 | 164 |
| 197.19 | 1064.000 | 14.00 | 14.455 46 | 0.006 527 | 153 |
| 200.48 | 1140.000 | 15.00 | 15.488 00 | 0.006 944 | 144 |
| 203.60 | 1216.000 | 16.00 | 16.520 52 | 0.007 359 | 136 |
| 206.57 | 1292.000 | 17.00 | 17.553 06 | 0.007 769 | 129 |
| 209.40 | 1368.000 | 18.00 | 18.585 60 | 0.008 178 | 122 |
| 212.10 | 1444.000 | 19.00 | 19.618 12 | 0.008 583 | 117 |
| 214.70 | 1520.000 | 20.00 | 20.650 66 | 0.008 986 | 111 |
| 217.20 | 1596.000 | 21.00 | 21.683 19 | 0.009 387 | 107 |
| 219.60 | 1672.000 | 22.00 | 22.715 72 | 0.009 785 | 102 |
| 221.90 | 1748.000 | 23.00 | 23.748 26 | 0.010 182 | 98 |
| 224.20 | 1824.000 | 24.00 | 24.780 80 | 0.010 575 | 95 |
| 226.30 | 1900.000 | 25.00 | 25.813 32 | 0.010 968 | 91 |
| 236.20 | 2280.000 | 30.00 | 30.976 00 | 0.012 903 | 78 |
| 244.85 | 2660.000 | 35.00 | 36.138 64 | 0.014 663 | 68 |
| 252.55 | 3040.000 | 40.00 | 41.301 33 | 0.016 644 | 60 |
| 259.52 | 3420.000 | 45.00 | 46.463 98 | 0.018 497 | 54 |
| 265.89 | 3800.000 | 50.00 | 51.628 64 | 0.020 306 | 49 |

D'après le tableau précédent, on voit que, sous la pression atmosphérique $0^m,76$, un kilogramme ou un litre d'eau produit 1696 litres de vapeur, ou à peu près 1700 litres.

M. Regnault vient encore de faire des expériences pour déterminer la force élastique de la vapeur aux températures de $-32°$ à $+230°$. Les résultats qu'il a obtenus sont représentés avec beaucoup d'exactitude par les formules d'interpolation suivantes :

1° Pour les températures de $-32°$ à $0°$,

$$F = a + b\alpha^x. \qquad (a)$$

F force élastique, en millimètres de mercure;
$a = -0.08038$ quantité constante;
$b$ constante, $\log b = \bar{1}.6024724$;
$\alpha$ constante, $\log \alpha = 0.0333980$;
$x = t + 32$, $t$ étant la température de la vapeur indiquée par le thermomètre à air en degrés centigrades, $t$ est négatif;

2° Pour les températures de $0°$ à $100°$,

$$\log F = a + b\alpha_1^t - c\beta_1^t. \qquad (b)$$

$$a = 4.7384380, \quad \log b = \bar{2}.1340339, \quad \log c = 0.6116485,$$

$$\log \alpha_1 = 0.006865036, \quad \log \beta_1 = \bar{1}.9967249;$$

3° Pour les températures de $100°$ à $230°$,

$$\log F = a - b\alpha_1^x - c\beta_1^x. \qquad (c)$$

$$a = 6.2640348, \quad \log b = 0.1397743, \quad \log c = 0.6924351,$$

$$\log \alpha_1 = \bar{1}.9940492\,92, \quad \log \beta_1 = \bar{1}.9983438\,62;$$

$x = T + 20$, T étant la température en degrés centigrades, comptée à partir de la glace fondante.

C'est en faisant usage de ces formules que l'on a calculé, dans la limite relative à chacune d'elles, les résultats du tableau suivant, où F est exprimé en centimètres. On aurait pu calculer ce tableau dans toute son étendue avec la formule unique (*c*) : on aurait obtenu des valeurs pour ainsi dire identiques à celles qui ont été calculées avec la formule (*b*) entre $40°$ et $100°$; mais dans les températures plus basses les forces élastiques données par la formule (*c*) seraient un peu trop faibles.

*TABLE des forces élastiques de la vapeur d'eau à différentes températures, d'après les expériences de* M. Regnault.

| TEMPÉRATURES. | FORCES ÉLASTIQUES en centimètres. | FORCES ÉLASTIQUES en atmosphères. | TEMPÉRATURES. | FORCES ÉLASTIQUES en centimètres. | FORCES ÉLASTIQUES en atmosphères. | TEMPÉRATURES. | FORCES ÉLASTIQUES en centimètres | FORCES ÉLASTIQUES en atmosphères. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| −32° | 0.0320 | | +18° | 1.5357 | | +68° | 21.3596 | |
| 31 | 0.0352 | | 19 | 1.6346 | | 69 | 22.3165 | |
| 30 | 0.0386 | | 20 | 1.7391 | 0.023 | 70 | 23.3093 | 0.306 |
| 29 | 0.0424 | | 21 | 1.8495 | | 71 | 24.3393 | |
| 28 | 0.0464 | | 22 | 1.9659 | | 72 | 25.4073 | |
| 27 | 0.0508 | | 23 | 2.0888 | | 73 | 26.5147 | |
| 26 | 0.0555 | | 24 | 2.2184 | | 74 | 27.6624 | |
| 25 | 0.0605 | | 25 | 2.3550 | | 75 | 28.8517 | |
| 24 | 0.0660 | | 26 | 2.4988 | | 76 | 30.0838 | |
| 23 | 0.0719 | | 27 | 2.5505 | | 77 | 31.3600 | |
| 22 | 0.0783 | | 28 | 2.8101 | | 78 | 32.6811 | |
| 21 | 0.0853 | | 29 | 2.9782 | | 79 | 34.0488 | |
| 20 | 0.0927 | | 30 | 3.1548 | 0.042 | 80 | 35.4643 | 0.466 |
| 19 | 0.1008 | | 31 | 3.3406 | | 81 | 36.9287 | |
| 18 | 0.1095 | | 32 | 3.5359 | | 82 | 38.4435 | |
| 17 | 0.1189 | | 33 | 3.7411 | | 83 | 40.0101 | |
| 16 | 0.1290 | | 34 | 3.9565 | | 84 | 41.6298 | |
| 15 | 0.1400 | | 35 | 4.1827 | | 85 | 43.3041 | |
| 14 | 0.1518 | | 36 | 4.4201 | | 86 | 45.0344 | |
| 13 | 0.1646 | | 37 | 4.6691 | | 87 | 46.8221 | |
| 12 | 0.1783 | | 38 | 4.9302 | | 88 | 48.6687 | |
| 11 | 0.1933 | | 39 | 5.2039 | | 89 | 50.5759 | |
| 10 | 0.2093 | | 40 | 5.4906 | 0.072 | 90 | 52.5450 | 0.691 |
| 9 | 0.2267 | | 41 | 5.7910 | | 91 | 54.5778 | |
| 8 | 0.2455 | | 42 | 6.1055 | | 92 | 56.6757 | |
| 7 | 0.2658 | | 43 | 6.4346 | | 93 | 58.8406 | |
| 6 | 0.2876 | | 44 | 6.7790 | | 94 | 61.0740 | |
| 5 | 0.3113 | | 45 | 7.1391 | | 95 | 63.3778 | |
| 4 | 0.3368 | | 46 | 7.5158 | | 96 | 65.7535 | |
| 3 | 0.3644 | | 47 | 7.9093 | | 97 | 68.2029 | |
| 2 | 0.3941 | | 48 | 8.3204 | | 98 | 70.7280 | |
| 1 | 0.4263 | | 49 | 8.7499 | | 99 | 73.3305 | |
| 0 | 0.4600 | 0.006 | 50 | 9.1982 | 0.121 | 100 | 76.0000 | 1.000 |
| + 1 | 0.4940 | | 51 | 9.6661 | | 101 | 78.7590 | |
| 2 | 0.5302 | | 52 | 10.1543 | | 102 | 81.6010 | |
| 3 | 0.5687 | | 53 | 10.6636 | | 103 | 84.5280 | |
| 4 | 0.6097 | | 54 | 11.1945 | | 104 | 87.5410 | |
| 5 | 0.6534 | | 55 | 11.7478 | | 105 | 90.6410 | |
| 6 | 0.6998 | | 56 | 12.3244 | | 106 | 93.8310 | 1.235 |
| 7 | 0.7492 | | 57 | 12.9251 | | 107 | 97.1140 | |
| 8 | 0.8017 | | 58 | 13.5505 | | 108 | 100.4910 | |
| 9 | 0.8574 | | 59 | 14.2015 | | 109 | 103.965 | |
| 10 | 0.9165 | 0.012 | 60 | 14.8791 | 0.196 | 110 | 107 537 | 1.415 |
| 11 | 0.9792 | | 61 | 15.5839 | | 111 | 111.209 | |
| 12 | 1.0457 | | 62 | 16.3170 | | 112 | 114.983 | 1.513 |
| 13 | 1.1162 | | 63 | 17.0791 | | 113 | 118.861 | |
| 14 | 1.1908 | | 64 | 17.8714 | | 114 | 122.847 | |
| 15 | 1.2699 | | 65 | 18.6945 | | 115 | 126.941 | |
| 16 | 1.3536 | | 66 | 19.5496 | | 116 | 131.147 | |
| 17 | 1.4421 | | 67 | 20.4376 | | 117 | 135.466 | |

| TEMPÉRATURES. | FORCES ÉLASTIQUES en | | TEMPÉRATURES. | FORCES ÉLASTIQUES en | | TEMPÉRATURES. | FORCES ÉLASTIQUES en | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | centimètres. | atmosphères. | | centimètres. | atmosphères. | | centimètres. | atmosphères. |
| +118° | 139.902 | | +156° | 419.659 | 5.522 | +194° | 1029.701 | |
| 119 | 144.455 | | 157 | 430.688 | | 195 | 1051.963 | |
| 120 | 149.128 | 1.962 | 158 | 441.945 | | 196 | 1074.595 | |
| 121 | 153.925 | | 159 | 453.436 | 5.966 | 197 | 1097.500 | |
| 122 | 158.847 | | 160 | 465.162 | 6.120 | 198 | 1120.982 | |
| 123 | 163.896 | | 161 | 477.128 | | 199 | 1144.746 | |
| 124 | 169.076 | | 162 | 489.336 | 6.439 | 200 | 1168.896 | 15.380 |
| 125 | 174.388 | | 163 | 501.791 | | 201 | 1193.437 | |
| 126 | 179.835 | | 164 | 514.497 | | 202 | 1218.369 | |
| 127 | 185.420 | | 165 | 527.454 | 6.940 | 203 | 1243.700 | |
| 128 | 191.147 | 2.515 | 166 | 540.669 | | 204 | 1269.430 | |
| 129 | 197.015 | | 167 | 554.143 | | 205 | 1295.566 | |
| 130 | 203.028 | 2.671 | 168 | 567.882 | 7.472 | 206 | 1322.112 | |
| 131 | 209.194 | | 169 | 581.890 | | 207 | 1349.075 | |
| 132 | 215.503 | | 170 | 596.166 | 7.844 | 208 | 1376.453 | |
| 133 | 221.969 | | 171 | 610.719 | 8.036 | 209 | 1404.252 | |
| 134 | 228.592 | 3.008 | 172 | 625.548 | | 210 | 1432.480 | 18.848 |
| 135 | 235.373 | | 173 | 640.660 | | 211 | 1461.132 | |
| 136 | 242.316 | | 174 | 656.055 | | 212 | 1490.222 | |
| 137 | 249.423 | | 175 | 671.743 | | 213 | 1519.748 | |
| 138 | 256.700 | | 176 | 687.722 | 9.049 | 214 | 1549.717 | |
| 139 | 264.144 | 3.476 | 177 | 703.997 | | 215 | 1580.133 | |
| 140 | 271.763 | 3.576 | 178 | 720.572 | | 216 | 1610.994 | |
| 141 | 279.557 | | 179 | 737.452 | | 217 | 1642.315 | |
| 142 | 287.530 | | 180 | 754.639 | 9.929 | 218 | 1674.090 | |
| 143 | 295.686 | | 181 | 772.137 | | 219 | 1706.329 | |
| 144 | 304.026 | 4.000 | 182 | 789.952 | | 220 | 1739.036 | 22.882 |
| 145 | 312.555 | | 183 | 808.084 | | 221 | 1772.213 | |
| 146 | 321.274 | | 184 | 826.540 | | 222 | 1805.864 | |
| 147 | 330.187 | | 185 | 845.323 | | 223 | 1839.994 | |
| 148 | 339.298 | 4.464 | 186 | 864.435 | | 224 | 1874.607 | |
| 149 | 348.609 | | 187 | 883.882 | | 225 | 1909.704 | |
| 150 | 358.123 | 4.712 | 188 | 903.668 | | 226 | 1945.292 | |
| 151 | 367.843 | | 189 | 923.795 | | 227 | 1981.376 | |
| 152 | 377.774 | 4.971 | 190 | 944.270 | 12.425 | 228 | 2017.961 | |
| 153 | 387.918 | | 191 | 965.093 | | 229 | 2055.048 | |
| 154 | 398.277 | | 192 | 986.271 | | 230 | 2092.640 | 27.535 |
| 155 | 408.856 | | 193 | 1007.804 | | | | |

**273.** *Relations entre la densité de la vapeur d'eau et celle de l'air.* On peut admettre, dans la pratique, que la densité de la vapeur d'eau, saturée ou non, est toujours les 5/8 de celle de l'air à la même température et à la même pression. Ainsi, sans faire usage du tableau (272), ayant la densité de l'air à 0° et sous la pression 0m.76 (44), on déterminera sa densité à une température et à une pression quelconque (262), et en prenant les 5/8, on aura la densité de la vapeur d'eau à la même température et sous la même pression.

**274.** *Mélange des gaz et des vapeurs.* Lorsqu'un liquide est introduit

dans un espace limité rempli d'un gaz qui n'exerce aucune action chimique sur ce liquide, il se vaporise autant de liquide que si l'espace était vide, seulement la vaporisation est moins prompte. La force élastique de la vapeur formée est la même que si le gaz n'existait pas, et s'ajoute à celle de ce gaz; de sorte que la force élastique d'un mélange de gaz et de vapeur est égale à la force élastique du gaz, augmentée de celle de la vapeur correspondant à la température du mélange (272). Il en est de même lorsqu'on introduit plusieurs gaz dans un même espace limité; la force élastique du mélange est égale à la somme des forces élastiques des différents gaz occupant séparément le même espace.

V étant le volume d'un gaz saturé de vapeur à la température $t°$, et P la pression du mélange, le tableau page 348 donne la tension $p$ de la vapeur à $t°$, et $P-p$ est la force élastique du gaz. Ayant alors les volumes, les températures et les tensions du gaz et de la vapeur, on peut déterminer le poids de chacun de ces deux corps entrant dans le mélange.

**275.** *TABLEAU du poids de vapeur contenu dans un mètre cube d'air saturé à différentes températures, sous la pression atmosphérique* $0^m.76$.

| TEMPÉRATURE en deg. cent. | POIDS en grammes. | TEMPÉRATURE en deg. cent. | POIDS en grammes. | TEMPÉRATURE en deg. cent. | POIDS en grammes. |
|---|---|---|---|---|---|
| 0° | 5.2 | 35° | 37.00 | 70° | 141.96 |
| 5 | 7.2 | 40 | 46.40 | 75 | 173.74 |
| 10 | 9.50 | 45 | 58.60 | 80 | 199.24 |
| 15 | 12.83 | 50 | 72.00 | 85 | 227.20 |
| 20 | 16.78 | 55 | 88.74 | 90 | 251.34 |
| 25 | 22.01 | 60 | 105.84 | 95 | 273.78 |
| 30 | 28.51 | 65 | 127.20 | 100 | 295.00 |

**276.** *Influence des matières dissoutes dans un liquide à vaporiser.* Dans un vase de verre, l'eau bout avec soubresauts, et l'ébullition n'a lieu, d'après M. Gay-Lussac, qu'à une température de 1°.3 plus élevée que dans un vase métallique. L'acide sulfurique présente le même phénomène, et les soubresauts sont d'autant plus violents que le liquide a plus de cohésion et qu'il exerce sur la matière du vase une action moléculaire plus grande. Quelques parcelles métalliques projetées dans le vase arrêtent les soubresauts, et la température devient celle que l'on obtiendrait dans un vase métallique.

Le point d'ébullition des liquides n'est pas changé par les corps étrangers qui n'y sont que mécaniquement mélangés, comme les particules de sable, de sulfate de chaux, de carbonate de chaux, etc.; mais il est toujours modifié par les matières chimiquement combinées

au liquide ; ainsi tous les sels solubles retardent le point d'ébullition de l'eau, et l'expérience prouve :

1° Que la vapeur produite à la surface des dissolutions salines est de la vapeur d'eau pure ;

2° Que la tension de la vapeur dans un espace limité et à une température donnée est moindre que celle de la vapeur produite par de l'eau pure, et qu'elle varie avec la nature du sel dissout ;

3° Que sous la pression $0^m.76$, la température de la vapeur formée est toujours de 100°, quelle que soit la nature du sel dissout et du vase contenant la dissolution.

*TABLEAU des points d'ébullition de quelques dissolutions saturées, sous la pression* $0^m.76$, d'après les expériences de M. Legrand.

| DÉSIGNATION DES SELS DISSOUS. | TEMPÉRATURES d'ébullition, en degrés centigrades. | QUANTITÉS de sel qui saturent 100 d'eau. |
|---|---|---|
| Chlorate de potasse | 104.2 | 61.5 |
| Chlorure de barium | 104.4 | 60.1 |
| Carbonate de soude | 104.6 | 48.5 |
| Phosphate de soude | 105.5 | 113.2 |
| Chlorure de potassium | 108.3 | 59.4 |
| Chlorure de sodium | 108.4 | 41.2 |
| Hydrochlorate d'ammoniaque | 114.2 | 88.9 |
| Tartrate neutre de potasse | 114.67 | 296.2 |
| Nitrate de potasse | 115.9 | 335.1 |
| Chlorure de strontium | 117.9 | 117.5 |
| Nitrate de soude | 121.0 | 224.8 |
| Acétate de soude | 124.37 | 209.0 |
| Carbonate de potasse | 135.0 | 205.0 |
| Nitrate de chaux | 151.0 | 362.2 |
| Acétate de potasse | 169.0 | 798.2 |
| Chlorure de calcium | 179.5 | 325.0 |
| Nitrate d'ammoniaque | 180.0 | infini |

277. *Tension des vapeurs autres que la vapeur d'eau.* D'après Dalton, les vapeurs de tous les liquides ayant des tensions égales à des températures également éloignées de celle de leur point d'ébullition sous la pression $0^m,76$, il sera facile, au moyen des tableaux pages 348 et 351, et de celui n° 270, qui donne la température d'ébullition de quelques liquides, d'avoir la force élastique de la vapeur de ces liquides à une température quelconque. Ainsi la force élastique de la vapeur d'alcool à $78°.4 + 20° = 98°.4$, sera la même que celle de la vapeur d'eau à $100° + 20° = 120°$ ; elle sera donc de 1.962 atmosphères (page 352).

D'après des observations de plusieurs physiciens, il résulte que la loi si commode de Dalton n'est pas absolument rigoureuse, et qu'à de grandes distances des points d'ébullition elle s'écarte sensiblement de la vérité. C'est ce que confirme la table suivante, due aux expériences de M. Regnault.

| TEMPÉRATURES. | Forces élastiques en centimètres de mercure. | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Eau. | Essence de térébenthine. | Alcool. | Chloroforme. | Sulfure de carbone. | Éther. |
| —20° | 0.09 | » | 0.33 | » | » | 6.92 |
| —10 | 0.21 | » | 0.65 | » | 7.90 | 11.32 |
| 0 | 0.46 | 0.21 | 1.27 | » | 12.73 | 18.23 |
| 10 | 0.92 | 0.23 | 2.41 | 13.04 | 19.93 | 23.65 |
| 20 | 1.74 | 0.43 | 4.40 | 19.02 | 29.82 | 43.48 |
| 30 | 3.15 | 0.70 | 7.84 | 27.61 | 43.46 | 63.70 |
| 40 | 5.49 | 1.12 | 13.41 | 36.40 | 61.75 | 91.36 |
| 50 | 9.20 | 1.72 | 22.03 | 52.43 | 85.27 | 126.80 |
| 60 | 14.88 | 2.69 | 35.00 | 73.80 | 116.26 | 173.03 |
| 70 | 23.31 | 4.19 | 53.92 | 97.62 | 154.90 | 230.95 |
| 80 | 35.46 | 6.12 | 81.28 | 136.78 | 203.05 | 294.72 |
| 90 | 52.55 | 9.10 | 119.04 | 181.15 | 262.31 | 389.90 |
| 100 | 76.00 | 13.49 | 168.50 | 235.46 | 332.13 | 492.04 |
| 110 | 107.54 | 18.73 | 235.18 | 302.04 | 413.63 | 624.90 |
| 120 | 149.13 | 25.70 | 320.78 | 381.80 | 512.16 | » |
| 130 | 203.03 | 34.70 | 433.12 | 472.10 | 626.06 | » |
| 140 | 271.76 | 46.23 | 563.77 | » | » | » |
| 150 | 358.12 | 60.45 | 725.78 | » | » | » |

## SOURCES DE FROID.

**278.** *TABLEAU du froid produit par quelques mélanges frigorifiques.*

| DÉSIGNATION DES MÉLANGES. | ABAISSEMENT de température. | FROID produit. |
|---|---|---|
| Eau, 16 parties ; nitre, 5 ; hydrochlorate d'ammoniaque, 5. . . . . | de + 10° à — 12° | 22° |
| Eau, 16 ; hydrochlorate d'ammoniaque, 5 ; nitre, 5 ; sulfate de soude, 8. . . . . | de + 10 à — 16 | 26 |
| Eau, 1 ; nitrate d'ammoniaque, 1. . . . . | de + 10 à — 16 | 26 |
| Eau, 1 ; nitrate d'ammoniaque, 1 ; sous-carbonate de soude, 1. . . . . | de + 10 à — 19 | 29 |
| Eau, 4 ; chlorure de potassium, 57; chlorhydrate d'ammoniaque, 32 ; nitrate de potasse, 20.. . | » | 15 |
| Neige ou glace pilée, 2; sel marin, 1. . . . . | » | 20 |
| Neige ou glace pilée, 5 ; sel marin, 2 ; sel ammoniaque, 1. . . . . | » | 24 |
| Neige ou glace pilée, 24 ; sel marin, 10 ; sel ammoniaque, 5 ; nitre, 5. . . . . | » | 28 |
| Neige ou glace pilée, 12 ; sel marin, 5 ; nitrate d'ammoniaque, 5. . . . . | » | 31 |
| Sulfate de soude, 3 ; acide azotique étendu, 2. | de + 10 à — 19 | 29 |
| Sulfate de soude, 6 ; sel ammoniaque, 4 ; nitre, 2 ; acide azotique étendu, 4. . . . . | de + 10 à — 23 | 33 |
| Sulfate de soude, 6 ; nitrate d'ammoniaque, 5 ; acide azotique étendu, 4. . . . . | de + 10 à — 26 | 36 |
| Phosphate de soude, 9 ; acide azotique étendu, 4. | de + 10 à — 29 | 39 |
| Sulfate de soude, 20; acide sulfurique à 36°, 16. | de + 10 à — 8.15 | 18.15 |
| Sulfate de soude, 22 ; résidu d'éther à 33°, 17.. | de + 10 à — 8 | 18 |
| Sulfate de soude, 8 ; acide chlorhydrique, 5.. . | de + 10 à — 17 | 27 |

**279.** *TABLEAU des abaissements de température obtenus par M. Gay-Lussac, en faisant arriver un courant d'air desséché au chlorure de calcium sur un thermomètre dont la boule était recouverte d'une batiste humide.*

| TEMPÉRATURES de l'air sec. | ABAISSEMENTS de température. | TEMPÉRATURES de l'air sec. | ABAISSEMENTS de température. | TEMPÉRATURES de l'air sec. | ABAISSEMENTS de température. |
|---|---|---|---|---|---|
| 0° | 5°82 | 9° | 8°61 | 18° | 11°96 |
| 1 | 6.09 | 10 | 8.97 | 19 | 12.34 |
| 2 | 6.37 | 11 | 9.37 | 20 | 12.73 |
| 3 | 6.66 | 12 | 9.70 | 21 | 13.12 |
| 4 | 6.96 | 13 | 10.07 | 22 | 13.51 |
| 5 | 7.27 | 14 | 10.44 | 23 | 13.90 |
| 6 | 7.59 | 15 | 10.82 | 24 | 14.30 |
| 7 | 7.92 | 16 | 11.20 | 25 | 14.70 |
| 8 | 8.26 | 17 | 11.58 | | |

**280.** Dans ces derniers temps, M. Faraday, dans des expériences relatives à la liquéfaction et à la solidification des gaz, en plaçant sous la cloche d'une bonne machine pneumatique une pâte d'acide carbonique solidifié et d'éther (281), et en faisant fonctionner la machine, a obtenu, pour les pressions sous la cloche, en centimètres de mercure :

72.1 49.3 23.9 18.8 13.7 8.6 6.1 3.5 3.0

les températures :

—77° —80° —85° —87° —91° —95° —99° —107° —110°.

### LIQUÉFACTION ET SOLIDIFICATION DES GAZ.

**281.** *Liquéfaction et solidification des gaz.* On est déjà parvenu à liquéfier et même solidifier un grand nombre de gaz, et il est probable que tous pourraient l'être si l'on pouvait produire des températures assez basses et fabriquer des vases assez résistants.

A —80°, et sous une pression inférieure à 1 atmosphère (280), M. Faraday a obtenu à l'état liquide ou à l'état solide le :

Chlore, cyanogène, ammoniaque, acide sulfhydrique, hydrogène arséniqué, acide iodhydrique, acide bromhydrique, acide carbonique.

*Températures de fusion observées par M. Faraday pour les gaz qui ont pu être solidifiés.*

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Cyanogène. . . . . | — 35° | Oxyde de chlore. . | — 60° | Acide sulfhydrique. | — 86° |
| Acide iodhydrique. | — 51 | Ammoniaque. . . | — 75 | Acide bromhydrique. | — 88 |
| Acide carbonique.. | — 58 | Acide sulfureux. . | — 76 | Protoxyde d'azote.. | — 100 |

Les six gaz suivants n'ont pu être solidifiés, même à — 110°

Gaz oléfiant, acide fluosilicique, hydrogène protophosphoré, acide fluoborique, acide chlorhydrique, hydrogène arséniqué.

Les cinq gaz suivants n'ont donné à M. Faraday aucun signe de liquéfaction, même en les maintenant à la température de —110°, et à la pression de 27 atmosphères pour les deux premiers, de 40 pour le troisième et de 50 pour les deux derniers :

Hydrogène, oxygène, oxyde de carbone, azote, bioxyde d'azote.

M. Faraday obtenait le froid à l'aide de la machine pneumatique, comme nous l'avons indiqué ci-dessus (280), et la pression du gaz, au moyen d'un système de deux pompes de diamètres différents.

*Maximums de tension des trois gaz qui se liquéfient le plus facilement.*

| TEMPÉRATURE. | GAZ SULFUREUX. | CYANOGÈNE. | AMMONIAQUE. |
|---|---|---|---|
| | atm. | atm. | atm. |
| — 18° | 0.7 | 1.2 | 2.5 |
| 0 | 1.5 | 2.4 | 4.4 |
| + 4.4 | 1.8 | 2.8 | 5.0 |
| 32 | 4.3 | 6.2 | 11.0 |
| 38 | 5.1 | 7.3 | » |

*TABLEAU des températures en degrés centigrades et des pressions en atmosphères correspondant à la liquéfaction de quelques gaz.*

| TEMPÉRATURE. | GAZ oléfiant. | ACIDE carbonique. | PROTOXYDE d'azote. | GAZ chlorhydrique. | GAZ sulfhydrique. | HYDROGÈNE arséniqué. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ° | | | | | | |
| —87·2 | » | » | 1.0 | » | » | » |
| 78.9 | » | 1.2 | 1.4 | » | » | » |
| 73.3 | 9.3 | 1.8 | 1.8 | 1.8 | 1.0 | » |
| 59.4 | » | 4.6 | 3.6 | » | » | 0.9 |
| 51.1 | 13.9 | 7.1 | 5.4 | 5.1 | 1.9 | 1.4 |
| 40.0 | 17.0 | 11.1 | 8.7 | 7.7 | 2.9 | 2.3 |
| 28.9 | 21.2 | 16.3 | 13.3 | 10.9 | 4.2 | 3.5 |
| 17.8 | 27.2 | 22.8 | 19.3 | 15.0 | 6.1 | 5.2 |
| 6.7 | 36.8 | 30.7 | 26.8 | 21.1 | 8.4 | 7.4 |
| 1.1 | 42.5 | 37.2 | 31.1 | 25.3 | 9.9 | 8.7 |
| +2.4 | » | » | » | 30.7 | 11.8 | 10.0 |

Des expériences de M. Pouillet :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| L'acide carbonique se liquéfie à | 10° | sous la pression de | 45 | atmosphères, |
| Le protoxyde d'azote | *id.* | 11 | *id.* | 43 |
| L'ammoniaque | *id.* | 10 | *id.* | 5 |
| Le gaz sulfureux | *id.* | 8 | *id.* | 2.5 |

C'est M. Thilorier qui a le premier obtenu, en grande masse, l'acide carbonique à l'état liquide et à l'état solide. L'acide carbonique liquide étant renfermé dans un réservoir assez résistant, en lui donnant une issue au moyen d'un robinet de forme convenable, il se vaporise vivement sous la pression atmosphérique, et la chaleur latente qu'il absorbe abaisse la température au point de congeler la portion d'acide restée dans le réservoir. Sa température est en effet de 50 ou 60° au-dessous de zéro. Abandonné à l'air, l'acide carbonique solide se vaporise sans se liquéfier. En versant sur un demi-litre ou un litre d'acide carbonique solide une quantité convenable d'éther sulfurique, on obtient une pâte semi-fluide qui se conserve plus longtemps que l'acide carbonique seul, et qui donne un contact plus parfait, soit avec les thermomètres, soit avec les corps à refroidir. C'est cette pâte que M. Faraday a employée pour faire ses expériences (280).

## PUISSANCES CALORIFIQUES DES COMBUSTIBLES.

**282.** On appelle *puissance calorifique d'un combustible*, la quantité de chaleur que dégage, en se brûlant complétement, 1 kilogramme de ce combustible. La puissance calorifique d'un même combustible est constante, quelles que soient d'ailleurs les circonstances dans lesquelles s'opère la combustion.

*TABLEAU des puissances calorifiques de quelques matières combustibles, en unités de chaleur* (265). (*Extrait du traité de la chaleur considérée dans ses applications*, de M. PÉCLET).

| DÉSIGNATION DES MATIÈRES. | NOMS des opérateurs. | PUISSANCES calorifiques. |
|---|---|---|
| Carbone pur. . . . . | Despretz. | 7 800 |
| Hydrogène pur. . . . . | Laplace. | 23 400 |
| *Id.* . . . . . | Clément. | 22 115 |
| *Id.* . . . . . | Despretz. | 23 640 |
| Hydrogène protocarboné. . . . . | Dalton. | 6 375 |
| Hydrogène bicarboné. . . . . | *id.* | 6 600 |
| Oxyde de carbone. . . . . | *id.* | 1 857 |
| Huile d'olive. . . . . | Rumfort. | 9 044 |
| *Id.* . . . . . | Lavoisier. | 11 196 |
| Huile de colza épurée. . . . . | Rumfort. | 9 307 |
| Éther sulfurique, *densité* = 0.728 à 20° . . . . . | *id.* | 8 030 |
| Alcool à 42° (à 15°.5 de température) . . . . . | *id.* | 6 195 |
| *Id.* à 35° *id.* . . . . . | *id.* | 5 261 |
| Suif. . . . . | *id.* | 8 639 |
| *Id.* . . . . . | Laplace. | 7 186 |
| Naphte, *densité* = 0.827. . . . . | Rumfort. | 7 338 |
| Phosphore. . . . . | Laplace. | 7 500 |
| Essence de térébenthine. . . . . | Dalton. | 4 500 |
| Cire blanche. . . . . | Rumfort. | 9 679 |
| *Id.* . . . . . | Laplace. | 10 500 |

| DÉSIGNATION DES MATIÈRES. | PUISSANCES calorifiques. |
|---|---|
| *D'après les dernières expériences de* DULONG. | |
| Hydrogène | 34 742 |
| Carbone passant seulement à l'état d'oxyde | 1 386 |
| Pour le poids d'oxyde de carbone renfermant 1 kilog. de carbone | 5 784 |
| Carbone passant à l'état d'acide carbonique | 7 170 |
| Oxyde de carbone | 2 488 |
| Hydrogène protocarboné | 13 205 |
| Hydrogène bicarboné | 12 032 |
| Soufre | 2 604 |
| Éther sulfurique | 9 430 |
| Essence de térébenthine | 10 836 |
| Huile d'olive | 9 862 |
| Alcool | 6 855 |

Pendant longtemps on a admis que la puissance calorifique d'un combustible était proportionnelle à la quantité d'oxygène nécessaire à sa combustion; c'est ce que semblaient confirmer les puissances calorifiques du carbone et de l'hydrogène obtenues par M. Despretz; mais cette loi est démentie par les dernières expériences de Dulong, qui ont donné pour le carbone et l'hydrogène des puissances calorifiques qui sont loin d'être dans le rapport des quantités d'oxygène absorbées.

*TABLEAU des puissances calorifiques des combustibles généralement employés dans l'industrie et des quantités de chaleur que rayonnent ces combustibles en brûlant, en supposant leurs puissances calorifiques égales à l'unité.*

| DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES. | PUISSANCES calorifiques. | POUVOIRS rayonnants. |
|---|---|---|
| Bois desséché à 100° | 3600 | 0.28 |
| Bois ordinaire à 0.20 d'eau | 2800 | 0.25 |
| Charbon de bois | 7000 | 0.50 |
| Tourbe desséchée à 60° | 4800 | 0.25 |
| Tourbe à 0.20 d'eau | 3600 | 0.25 |
| Charbon de tourbe | 5800 | 0.50 |
| Houille moyenne | 7500 | 0.55 |
| Coke à 0.15 de cendre | 6000 | |

*TABLEAU des quantités de chaleur moyennes produites par une mesure de volume de quelques combustibles.* Ces quantités de chaleur ont été obtenues en multipliant les puissances calorifiques des combustibles par le poids en kilogrammes de leur mesure de volume.

| DÉSIGNATION DES MESURES. | DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES. | CHALEUR produite en unités. |
|---|---|---|
| 1 hectolitre. . . . . | Houille de moyenne qualité. . . . . | 630 000 |
| 1 corde de 4 mètres cubes. . . | Noyer d'une année de coupe. . . . | 7 742 000 |
| *Id.* . . . | Chêne blanc d'une année de coupe. | 6 846 000 |
| *Id.* . . . | Frêne *id.* | 5 974 000 |
| *Id.* . . . | Hêtre *id.* | 5 603 000 |
| *Id.* . . . | Orme *id.* | 4 487 000 |
| *Id.* . . . | Bouleau *id.* | 4 102 000 |
| *Id.* . . . | Châtaignier *id.* | 4 035 000 |
| *Id.* . . . | Charme *id.* | 5 572 000 |
| *Id.* . . . | Pin d'une année de coupe. . . . . | 4 263 000 |
| *Id.* . . . | Peuplier d'Italie *id.* | 3 069 000 |
| 1 hectolitre. . . . . | Charbon de noyer. . . . . | 292 000 |
| *Id.* . . . . . | *Id.* de chêne. . . . . | 255 000 |
| *Id.* . . . . . | *Id.* de frêne. . . . . | 219 000 |
| *Id.* . . . . . | *Id.* de hêtre. . . . . | 176 000 |
| *Id.* . . . . . | *Id.* d'orme. . . . . | 167 000 |
| *Id.* . . . . . | *Id.* de bouleau. . . . . | 153 000 |
| *Id.* . . . . . | *Id.* de châtaignier. . . . . | 146 000 |
| *Id.* . . . . . | *Id.* de charme. . . . . | 176 000 |
| *Id.* . . . . . | *Id.* de pin. . . . . | 160 000 |
| *Id.* . . . . . | *Id.* de peuplier d'Italie. . . . | 109 000 |
| 1 hectolitre comble. . . . . | Coke. . . . . | 230 000 |
| 1 corde pesant 2000 kilog. . . | Tourbe de Beauvais, 2e qualité. . . | 7 200 000 |

## COMBUSTIBLES.

**283.** *Combustibles.* Les combustibles le plus généralement employés dans l'industrie sont le bois, le charbon de bois, la tannée, la tourbe, le charbon de tourbe, la houille et le coke.

Le carbone et l'hydrogène sont les deux principaux éléments utiles qui composent les combustibles.

C'est vers la température de 500° que les combustibles commencent à brûler en donnant de la lumière (258).

**284.** *Bois.* Le bois est formé : 1° d'une matière que M. Payen appelle cellulose, qui constitue la charpente solide de toutes les plantes, et qui se compose de 0.444 de carbone, et de 0.556 d'oxygène et d'hydrogène dans les proportions convenables pour faire de l'eau ; 2° d'une matière incrustante de composition variable avec la nature des bois, très-riche en carbone, et contenant un petit excès d'hydrogène sur la quantité nécessaire à la composition de l'eau. Le bois contient en outre moyennement 0.015 de matières étrangères qui donnent naissance aux

cendres lors de la combustion : les bois de chauffage ordinaires contiennent à peu près 0.02 de ces matières étrangères.

Le bois vert contient de 0.37 à 0.48 d'eau, qu'il peut perdre sans que sa nature soit altérée ; celui de 4 à 5 mois de coupe, employée au charbonnage, en contient de 0.30 à 0.35, et celui de chauffage de 8 à 12 mois de coupe, de 0.20 à 0.25.

Il faut éviter de faire la coupe des bois lorsqu'ils sont en pleine sève ; ainsi, la saison d'hiver doit être choisie pour l'effectuer. On peut considérer quinze à vingt ans comme l'âge du bois à charbon, vingt-cinq à trente ans comme celui du bois à brûler, et cent ans et au-dessus comme celui du bois d'œuvre.

La France produit annuellement, d'après M. Héron de Villefosse, 9 804 928 cordes, de chacune 2.75 stères, de bois de chauffage ; ce qui équivaut à 84 163 426 francs.

D'après les expériences de Rumfort et celles de quelques autres opérateurs, on peut admettre que la puissance calorifique du bois que l'on a privé d'eau en le desséchant préalablement à 100°, est 3600$^{un.}$, et celle du bois ordinaire à brûler, contenant de 20 à 25 pour 100 d'eau, 2750$^{un.}$ en moyenne. La puissance calorifique paraît être la même pour tous les bois desséchés au même degré.

D'après M. Péclet, la quantité de chaleur rayonnée par le bois de hêtre en petits morceaux est à la quantité de chaleur entraînée par la fumée dans le rapport de 1 à 2.5, et, par suite, à la quantité totale de chaleur développée, dans celui de 1 à 3.5 ; ces rapports sont beaucoup plus grands pour les bois en gros morceaux donnant des charbons volumineux très-rayonnants (page 359).

M. Péclet a reconnu aussi que le pouvoir rayonnant était variable pour les différents bois en morceaux ordinaires, mais qu'il était à peu près le même pour tous les bois en petits morceaux.

*TABLEAU des poids du mètre cube de différents bois*, d'après M. Berthier.

| DÉSIGNATION DES BOIS. | ÉTAT DES BOIS. | POIDS en kilogram. |
|---|---|---|
| Chêne de futaie des environs de Moulins. | Coupé depuis un an, en bûches refendues. | 275 |
| *Id.* *id.* | *Id.*, scié en quatre. | 515 |
| Chêne de la forêt de Monadier, près Moulins. | Gros bois coupé depuis 3 ans, refendu. | 386 |
| *Id.* *id.* | *Id.*, scié en quatre. | 485 |
| Chêne des environs de Cahors. | Coupé depuis un an. | 525 |
| Chêne de charbonnage. | Même, long de 30 pouces. | 220 à 262 |
| Hêtre des environs de Moulins. | En gros rondins refendus. | 400 |
| *Id.* *id.* | Vermoulu en partie. | 375 |
| Bouleau des environs de Moulins. | En gros rondins. | 440 |
| Tremble. | De charbonnage. | 190 à 220 |
| Sapin de Moulins. | En gros bois. | 300 à 340 |
| Orme. | | 320 |
| Charme. | | 398 |

A Paris, le bois de chauffage ordinaire pèse de 700 à 750 kilog. la voie, et celui de charbonnage de 600 à 700 kilog. La voie est de 2 stères ou 2 mètres cubes Les bûches ayant $1^m,14$ de longueur, la mesure employée dans les chantiers pour livrer le stère a 1 mètre de longueur sur $0^m,88$ de hauteur.

Dans les arts, les effets des bois ne sont pas toujours proportionnels à leur puissance calorifique; ainsi, par exemple, s'il s'agit d'évaporer de l'eau dans une chaudière, ceux qui brûlent avec flamme sont les plus avantageux. Sous ce rapport, les différents bois sont rangés dans l'ordre suivant :

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Sycomore | 100 | Mélèze et orme | 72 | Tilleul | 55 |
| Pin sylvestre | 89 | Chêne blanc | 70 | Tremble | 51 |
| Hêtre et frêne | 87 | Bouleau | 68 | Aulne | 46 |
| Charme | 85 | Sapin | 63 | Saule | 40 |
| Alisier | 82 | Acacia | 59 | Peuplier d'Italie | 39 |
| Chêne-rouvre | 75 | | | | |

*TABLEAU des poids, des compositions en carbone et en hydrogène, et des puissances calorifiques du stère de différents bois secs, d'après les expériences récentes de M. Chevandier.*

| NATURE DES BOIS. | Poids d'un stère de bois sec. | Charbon contenu dans un stère. | Hydrogène libre contenu dans un stère. | Puissance calorifique d'un stère. | Puissance calorifique relative. |
|---|---|---|---|---|---|
| | kilog. | kilog. | kilog. | | |
| Chêne à glands sessiles (bois de quartiers). | 380 | 188.49 | 2.61 | 1 614 319 | 1.0000 |
| Hêtre (bois de quartiers) . . . . . | 380 | 187.20 | 2.64 | 1 604 824 | 0.9941 |
| Chêne, les deux variétés confondues (bois de quartiers) . . . . . | 371 | 184.02 | 2.55 | 1 576 101 | 0.9763 |
| Charme (bois de quartiers). . . . . | 370 | 179.73 | 2.28 | 1 532 082 | 0.9490 |
| Chêne à glands pédonculés (bois de quartiers). . . . . | 359 | 178.07 | 2.47 | 1 525 225 | 0.9448 |
| Bouleau (bois de quartiers). . . . . | 338 | 171.92 | 3.65 | 1 516 271 | 0.9392 |
| Charme (quartiers et rondins mêlés). . . | 361 | 175.35 | 2.23 | 1 494 938 | 0.9260 |
| Bouleau (quartiers et rondins mêlés). . . | 332 | 168.87 | 3.58 | 1 489 190 | 0.9224 |
| *Id.* (rondinage de brins) . . . . . | 318 | 161.75 | 3.43 | 1 426 434 | 0.8836 |
| Sapin, *id.* . . . . . | 312 | 158.89 | 2.94 | 1 386 376 | 0.8587 |
| Chêne, les deux variétés confondues (rondinage de brins). . . . . | 317 | 157.24 | 2.18 | 1 346 772 | 0.8342 |
| Hêtre (rondinage de brins). . . . . | 314 | 154.68 | 2.18 | 1 326 072 | 0.8214 |
| Aulne (bois de quartiers). . . . . | 293 | 149.52 | 2.98 | 1 311 993 | 0.8127 |
| Aulne (quartiers et rondins mêlés). . . . | 291 | 148.50 | 2.96 | 1 303 054 | 0.8071 |
| Charme (rondinage de brins). . . . . | 313 | 152.04 | 1.94 | 1 296 432 | 0.8030 |
| Hêtre (rondinage de branches). . . . . | 304 | 149.76 | 2.11 | 1 283 870 | 0.7953 |
| Sapin, *id.* . . . . . | 287 | 146.15 | 2.70 | 1 275 068 | 0.7898 |
| Aulne (rondinage de brins). . . . . | 283 | 144.41 | 2.88 | 1 267 217 | 0.7849 |
| Pin, *id.* . . . . . | 283 | 144.66 | 2.63 | 1 260 600 | 0 7808 |
| Pin (rondinage de branches). . . . . | 281 | 143.63 | 2.61 | 1 251 581 | 0.7752 |
| Charme, *id.* . . . . . | 298 | 144.75 | 1.84 | 1 234 029 | 0.7644 |
| Sapin (bois de quartiers). . . . . | 277 | 141.06 | 2.61 | 1 230 800 | 0.7624 |
| Saule (quartiers et rondins mêlés). . . . | 285 | 142.28 | 2.14 | 1 224 424 | 0.7584 |
| Bouleau (rondinage de branches). . . . . | 269 | 136.82 | 2.90 | 1 206 536 | 0.7473 |
| Saule (rondinage de brins). . . . . | 276 | 137.79 | 2.07 | 1 185 698 | 0.7344 |
| Tremble (quartiers et rondins mêlés). . . | 273 | 134.56 | 2.57 | 1 176 858 | 0.7290 |
| Chêne, les deux variétés confondues (rondinage de branches). . . . . | 277 | 137.40 | 1.90 | 1 176 674 | 0.7288 |
| Pin (bois de quartiers). . . . . | 256 | 130.86 | 2.38 | 1 140 375 | 0.7064 |

*TABLEAU des quantités d'eau hygrométrique contenues dans 100 de bois de différentes essences et de diverses qualités, 6 mois, 1 an, 18 mois et 2 ans après la coupe*, d'après M. Chevandier.

| BOIS. | BOIS DE QUARTIERS. | | | | RONDINAGE DE BRANCHES. | | | | RONDINAGE DE BRINS. | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 6 mois. | 1 an. | 18 mois. | 2 ans. | 6 mois. | 1 an. | 18 mois. | 2 ans. | 6 mois. | 1 an. | 18 mois. | 2 ans. |
| Hêtre. . . | 23.34 | 19.34 | 17.40 | 17.74 | 33.48 | 24.00 | 19.80 | 20.32 | 30.44 | 23.46 | 18.60 | 19.95 |
| Chêne. . . | 29.63 | 23.75 | 20.74 | 19.16 | 31.20 | 26.90 | 24.55 | 21.09 | 32.71 | 26.74 | 23.35 | 20.28 |
| Charme. . | 24.68 | 20.18 | 18.77 | 17.94 | 31.38 | 25.89 | 22.33 | 19.30 | 27.19 | 23.08 | 20.60 | 18.59 |
| Bouleau. . | 23.28 | 18.10 | 15.98 | 17.17 | 37.34 | 28.99 | 24.12 | 21.78 | 39.72 | 29.01 | 22.73 | 19.52 |
| Tremble. . | 31.00 | 21.55 | 15.87 | 16.77 | 35.69 | 26.01 | 24.85 | 19.44 | 40.45 | 26.22 | 17.77 | 17.92 |
| Aulne. . . | 22.37 | 19.17 | 15.27 | 16.72 | » | » | » | » | 42.43 | 24.09 | 19.06 | 18.05 |
| Saule. . . | » | » | » | » | » | » | » | » | 36.44 | 23.13 | 17.12 | 17.58 |
| Sapin. . . | 28.56 | 16.65 | 14.78 | 17.22 | 28.29 | 17.14 | 15.09 | 18.66 | 33.78 | 16.87 | 15.21 | 18.09 |
| Pin.. . . . | 29.31 | 28.54 | 15.81 | 17.96 | 35.30 | 17.59 | 15.72 | 17.39 | 41.49 | 18.67 | 15.63 | 17.42 |

Ce tableau fait voir qu'au bout d'un certain temps le bois reprend une portion de l'eau qu'il avait d'abord perdue.

285. *Charbon de bois.* Le charbon de bois donne moyennement 0,075 de cendres, et celui du commerce contient généralement de 10 à 12 pour 100 d'eau. M. Sauvage, ingénieur des mines, donne, pour la composition du charbon de bois fabriqué dans les forêts, 0.79 de carbone, 0.14 de matières volatiles et 0.07 de cendres.

D'après M. Despretz, la puissance calorifique du carbone pur est 7800; d'après les dernières expériences de Dulong, elle est 7170 (282); mais pour le charbon de bois fabriqué dans les forêts, on peut admettre, d'après M. Sauvage, que la puissance calorifique est les 0.85 environ de celle du carbone pur; elle serait donc $7170 \times 0{,}85 = 6095$; d'après M. Péclet, la puissance calorifique des charbons de bois varie de 6 600 à 7 000 unités (282).

Les valeurs relatives des divers charbons, sous le même volume, sont proportionnelles aux poids spécifiques de ces charbons, et sont, pour les charbons du commerce, 166 pour le charbon de noyer, 114 pour celui d'érable, 106 pour celui de chêne, et 75 pour celui du pin.

D'après M. Berthier, dans les départements du centre, le poids d'un mètre cube de charbon de chêne et de hêtre du commerce varie de 240 à 250$^k$; celui de bouleau, de 220 à 230$^k$, et celui de pin, de 200 à 210$^k$. Dans les Vosges, celui de chêne et de hêtre, rondinage, est de 228$^k$, et celui de sapin, 135$^k$. Dans les usines métallurgiques, dit M. d'Aubuisson, on admet généralement qu'un mètre cube de charbon en fragments de grosseur ordinaire pèse, pour le chêne et le hêtre, de 200 à 240$^k$; pour le pin et le mélèze, de 160 à 180$^k$, et pour le sapin et le châtaignier domestique, de 130 à 150$^k$.

D'après M. Péclet, le pouvoir rayonnant du charbon de bois est à peu près moitié de sa chaleur spécifique, c'est-à-dire que la quantité de chaleur qu'il rayonne est à peu près égale à la chaleur qu'entraîne la fumée, ou moitié de la chaleur totale développée (page 359).

D'après M. Berthier, tous les bois non résineux, carbonisés dans les mêmes circonstances, rendent, à poids égaux, la même quantité de charbon.

Par le mode de carbonisation en meules, employé dans les forêts, le bois ne donne que 17 à 18 pour 100 de son poids en charbon; pour les grandes meules, cette proportion est un peu dépassée. En volume, les petites meules rendent de 26 à 30 pour 100, et les grandes, de 30 à 35. Le bois distillé en vase clos rend à peu près 28 p. 100 de son poids en charbon.

Dans les départements des Ardennes et de la Meuse, les meules contiennent de 60 à 90 stères de bois (1/4 de hêtre et chêne, 1/4 de tremble et saule, et 1/2 de charme) en bûchettes de $0^m,76$ à $0^m,81$ de longueur, et le rendement en poids est de 0.21 en moyenne. La carbonisation dure de 7 à 12 jours.

C'est vers l'âge de vingt ans qu'il convient d'aménager les bois destinés au charbonnage; on profite de la grande croissance du jeune âge, tout en obtenant le bois le plus convenable à la carbonisation (page 361).

*Charbon roux.* MM. Honzeau et Fauveau, en carbonisant incomplétement du bois au moyen des gaz d'un haut fourneau, obtiennent, pour une corde de bois pesant de 375 à 380 kilog., 220 kilog. d'un charbon brun foncé, produisant autant d'effet que $117^k,7$ de charbon ordinaire; le rendement apparent du bois est ainsi de 31 pour 100 de son poids en charbon ordinaire.

*Emploi de la vapeur surchauffée à la carbonisation et à la dessiccation des bois, ainsi qu'à la cuisson du pain, du biscuit et de la viande*, par M. Violette, commissaire des poudres à la poudrière d'Esquerdes, près Saint-Omer.

Il s'agissait avant tout, pour M. Violette, de trouver les conditions thermométriques ou de température nécessaires et suffisantes à la transformation du bois en charbon doué de qualités déterminées et exigées dans diverses branches d'industrie. 100 parties de bois donnent, selon le mode de carbonisation, 40 parties ou 15 parties seulement de charbon, et il est évident que les deux charbons ainsi obtenus doivent différer dans leur composition chimique et leurs propriétés caractéristiques.

Le premier de ces charbons, d'une couleur rousse très-prononcée, contient deux fois plus de substances volatiles, et moitié moins de carbone pur que le second, qui est très-noir. Le premier est flexible, onctueux, moelleux au toucher; le second est roide, aigre, cassant. Le premier convient parfaitement, essentiellement à la fabrication de

la poudre de chasse superfine, et il importait d'arriver à le produire à coup sûr, sans mélange d'autres charbons. Telle est la première difficulté abordée et vaincue par M. Violette.

Il a constaté d'abord qu'à la température de 200° le bois ne se carbonise pas; qu'à 250° on n'obtient qu'un charbon non cuit, autrement dit des brûlots; qu'à 300° on forme le charbon *roux*, et qu'à 350° et au delà l'opération donne invariablement du charbon *noir*. Le temps nécessaire à la carbonisation varie d'ailleurs d'une demi-heure à trois heures; les produits passent progressivement et à volonté du charbon roux au charbon noir; le rendement enfin est d'autant moindre que la carbonisation est plus avancée.

On conçoit l'importance de ces premiers résultats, en se rappelant qu'on admettait que le bois ne se transformait en charbon qu'à la chaleur rouge, chaleur excessive si on la compare à la température de 250° ou 300°, démontrée suffisante pour M. Violette.

C'est en faisant usage de la vapeur d'eau surchauffée qu'est produite la carbonisation. La vapeur est fournie par un générateur ordinaire; elle passe dans un serpentin contourné en hélice; elle en sort à une température déterminée, 300° par exemple, quand il s'agit de produire du charbon roux; elle enveloppe un cylindre horizontal qui renferme le bois; elle pénètre dans ce cylindre, échauffe le bois, opère sa carbonisation complète; elle sort enfin du cylindre chargée des produits de la distillation.

Par ce procédé nouveau, le rendement en charbon roux a été de 39 pour 100, c'est-à-dire que la proportion de charbon qu'il s'agissait de produire a été deux fois plus grande; il y a plus, la poudre fabriquée avec le nouveau charbon présente une supériorité réelle, et, ce qui est mieux encore, le prix de revient du charbon et de la poudre diminue dans une notable proportion.

M. Violette est arrivé aussi à la cuisson du pain et du biscuit de mer à l'aide d'un courant de vapeur d'eau chauffée à 200°.

La vapeur d'eau surchauffée dessèche aussi avec rapidité, et il paraît que pour les bois de toute essence ce mode de dessiccation augmente la résistance à la rupture dans une très-grande proportion, malgré la réduction notable de l'équarrissage.

Il y a une température à laquelle correspond le maximum d'augmentation de résistance. Cette température est comprise entre 150 et 175° pour le bois d'orme, et entre 125 et 150° pour les autres bois. L'accroissement de résistance est de 2/3 pour le frêne, de 5/9 pour le chêne, de près de 1/2 pour le noyer, de 2/5 pour le sapin, et de plus de 1/3 pour l'orme.

*Charbon de Paris*. M. Popelin-Ducarre a eu l'idée de faire un mélange de poussier de charbon de bois, de houille et de goudron, et de le mouler en petits cylindres ayant les dimensions du charbon de bois.

Ces cylindres, placés dans des vases clos que l'on chauffe à de hautes températures dans des fours continus, prennent une grande dureté et forment un charbon d'un excellent usage. Le mélange se compose le plus habituellement de 33 à 40 litres de goudron pour 100 kilog. de charbon.

**236.** *Tannée.* M. Péclet rapporte que 1250 kilog. d'écorce de chêne donnent 1000 kilog. de tannée sèche, qui ont la même puissance calorifique que 800 kilog. de bois, ou que 270 à 300 kilog. de houille.

La puissance calorifique de la tannée parfaitement sèche est 3300, au lieu que celle de la tannée du commerce n'est que 2300.

Une machine de la force de 12 chevaux, construite dans un des faubourgs de Paris, consomme 12 kilog. de tannée par force de cheval et par heure.

A Paris, 1000 kilog. de tannée coûtent 10 fr.; l'équivalent de bois, 39 fr., et celui de houille, 15 fr.

**237.** *Tourbe.* La tourbe séchée à l'air libre, comme on le fait ordinairement, contient de 25 à 30 pour 100 d'eau qu'on ne peut lui faire perdre qu'en l'exposant à un courant d'air à la température de 50 ou 60°.

*TABLEAU des compositions de quelques tourbes, d'après M. Regnault, et de leurs puissances calorifiques, soit en prenant 23640 et 7800 pour les puissances calorifiques respectives de l'hydrogène en excès et du carbone; soit en prenant 34742 et 7170, comme les ont données les expériences de Dulong (282); soit encore en prenant les moyennes de ces valeurs.*

| DÉSIGNATION DES TOURBES. | COMPOSITION. | | | | HYDROGÈNE en excès. | PUISSANCE CALORIFIQUE. | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Carbone. | Hydrogène. | Oxygène. | Cendres. | | 1re hypothèse. | 2e hypothèse. | Moyenne. |
| De Vulcaire, près Abbeville. . . . | 57.03 | 5.63 | 34.76 | 5.58 | 1.69 | 4848 | 4673 | 4761 |
| De Long, près Abbeville.. . . . . | 58.09 | 5.93 | 31.37 | 4.61 | 2.04 | 5013 | 4873 | 4943 |
| Du Champ-de-Feu, près Fromont. . | 57.79 | 6.11 | 30.97 | 5.33 | 2.30 | 5051 | 4943 | 4997 |

Les tourbes qui ont fourni les résultats de ce tableau étant parfaitement sèches, on doit considérer ces résultats comme supérieurs à ceux fournis par les tourbes employées en industrie, qui contiennent 25 pour 100 d'eau. En tenant compte de cette eau, les tourbes du tableau donneraient 3600 pour puissance calorifique moyenne, c'est-à-dire à peu près celle du bois parfaitement sec ou moitié de celle de la houille moyenne (282); c'est ce que confirment les expériences en grand. On conçoit du reste qu'en raison de la composition si variable de la tourbe, il

est impossible d'assigner une valeur générale à sa puissance calorifique ; il y a des tourbes dont la puissance calorifique n'est que le 1/5 de celle de la houille. Pour quelques machines à vapeur chauffées à la tourbe, on a brûlé 12 kilog. de tourbe par force de cheval et par heure.

D'après M. Péclet, la quantité de chaleur rayonnée par la tourbe est à celle totale développée par le combustible dans le rapport de 1 à 2,2 (page 359).

**288.** *Charbon de tourbe.* Le charbon de bonne tourbe contient de 14 à 18 pour 100 de cendres.

On peut regarder la puissance calorifique du charbon de tourbe comme étant égale à celle du charbon qu'il contient ; elle est donc très-variable en raison de la quantité si diverse de cendres qui entre dans sa composition. Le charbon de tourbe d'Essonne donnant 18,2 pour 100 de cendres, il en résulte que sa puissance calorifique est de $7170 \times 81{,}8 = 5865$ (282).

D'après M. Péclet, de même que pour la tourbe, la quantité de chaleur rayonnée par le charbon de tourbe est à la quantité totale de chaleur développée, dans le rapport de 1 à 2,2 (page 359).

La tourbe des Ardennes, carbonisée en grand dans des fours en maçonnerie, donne, d'après M. Sauvage, un produit de 44 pour 100 d'un charbon qui se compose de 0 43 de carbone, 0.32 de matières volatiles et combustibles et 0.25 de cendres. On peut considérer 0.40 à 0.45 comme le rendement des tourbes en charbon. En meules contenant ordinairement de 5.50 à 8.25 mètres cubes de tourbe, ce rendement en poids, rapporte M. Landrin, n'est que de 20 à 25 pour 100, et en volume, de 15 à 18.

**289.** *Lignite, houille et anthracite.*

En France, le bassin houiller le plus remarquable est celui de la Loire, qui se divise en deux parties distinctes, ayant pour centre, l'une Saint-Étienne, et l'autre Rive-de-Gier. Ce bassin fournit annuellement 15 millions de quintaux métriques, en deux variétés, dont l'une est de la houille grasse maréchale de première qualité, et dont l'autre, moins collante et plus solide, est très-recherchée comme charbon de grille. Dans les mines de la Loire, la proportion du menu dépasse souvent les 2/3 de la quantité de houille extraite ; on en vend une partie en cet état, et le reste est transformé sur les lieux en coke.

Le bassin houiller de Valenciennes, qui est le prolongement du bassin belge de Mons, fournit 10 millions de quintaux par an. Les charbons d'Anzin sont gras, collants, en général peu sulfureux ; ceux de Denain sont plus flambants, moins collants et meilleurs pour la grille. Les mines de Raismes fournissent un charbon de grille maigre ; celles de Fresnes et du Vieux-Condé, un charbon sec anthraciteux. Le charbon d'Aniches est assez analogue à celui d'Anzin.

Alais, Decazeville, etc., produisent une grande quantité de houille consommée sur les lieux par les usines métallurgiques.

Le Creuzot donne une houille propre à la fabrication du coke. A Monceau, qui dépend de Blanzy, la houille est impropre à la fabrication du coke ; elle n'est employée que comme charbon de grille. Lorsqu'on veut produire une forte chaleur, comme dans le puddlage de la fonte, il faut le mélanger avec des charbons gras comme ceux de la Loire.

Les mines de Decize, près de la Loire, fournissent un charbon flambant et sulfureux comme celui de Blanzy, mais plus collant et plus durable au feu.

Les mines de Fins, dans l'Allier, donnent du charbon de forge comparable à celui de Saint-Étienne; celles de Commentry, dans le même département, en fournissent un qui est de très-bonne qualité et très-propre à la fabrication du coke.

Épinac (Saône-et-Loire) fournit des charbons de grille très-chauds, mais qui encrassent plus la grille que ceux de la Loire.

Les Alpes, le Maine et l'Anjou produisent une grande quantité d'anthracite employé à la cuisson de la chaux et de la brique.

Le Midi renferme beaucoup de lignites.

Les 63 bassins houillers de la France produisent annuellement 44 millions de quintaux métriques; la consommation s'élevant à 66 millions de quintaux, l'importation est donc de 22 millions de quintaux, dans lesquels la Belgique figure pour 13 millions et demi et l'Angleterre pour 6 millions.

Le prix moyen de la houille, prise sur la mine, est 0$^{f}$,90 les 100 kil. ou 0$^{f}$,75 l'hectolitre. A Paris, le prix de l'hectolitre, en gros, est de 3 fr.

La houille, au moment de son extraction, ne contient que 0,02 d'eau; mais dans le commerce, comme on n'a pas soin de l'abriter, elle en renferme toujours une quantité considérable.

D'après l'examen du tableau page 370, on est conduit à admettre 7500 pour la puissance calorifique de la houille et de l'anthracite; c'est du reste la valeur que des expériences faites en grand semblent assigner à la puissance calorifique de ces combustibles (282).

Dans les foyers, la houille donne une quantité de cendres plus considérable qu'à l'analyse; cela est dû aux parcelles de coke qui tombent de la grille et qui échappent à la combustion. Voici les quantités de cendres recueillies dans le cendrier, à la manufacture des tabacs de Paris, en opérant sur plus de 600 kilog. de houille.

| | |
|---|---|
| Houille dite ancien Anzin. . . . . | 0.079 |
| *Id.* de Newcastle (collante). . . . . | 0.071 |
| *Id.* de Denain (collante). . . . . | 0.082 |
| *Id.* dite nouvel Anzin (collante). . . . . | 0.057 |
| *Id.* de Decize (collante). . . . . | 0.101 |
| *Id.* des veines du Maton et du Buisson (Belgique). . . . . | 0.095 |
| *Id.* dite Flenu, première qualité. . . . . | 0.095 |

Dans les cas ordinaires de la pratique, les houilles donnent dans le cendrier un résidu variant de 10 à 20 pour cent, 15 à 16 en moyenne.

La houille se vend à la voie, qui équivaut à 15 hectolitres ras ou à 12 hectolitres combles; c'est l'hectolitre comble que l'on emploie généralement dans les mines.

*TABLEAU des analyses de quelques combustibles, faites par M. Regnault. Les houilles ont été préalablement desséchées à 120°, ce qui leur a fait éprouver une perte qui a varié de 1.36 à 1.60 pour 100. La quantité d'azote étant toujours très-faible, on l'a confondue avec l'oxygène. M. Péclet a calculé les puissances calorifiques des combustibles que contient ce tableau, en*

| DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES. | LOCALITÉ. | DENSITÉ. | |
|---|---|---|---|
| *Combustibles de la formation carbonifère.* | | | |
| Anthracite | Pensylvanie | 1.462 | — |
| *Id.* | Pays de Galles | 1.348 | |
| *Id.* | Mayenne | 1.367 | |
| *Id.* | Roldue | 1.343 | — |
| Houilles grasses et dures | Alais (Rochebelle) | 1.322 | |
| *Id.* | Rive-de-Gier (P. Henry) | 1.315 | |
| Houilles grasses maréchales | Rive-de-Gier, 1. | 1.298 | — |
| *Id.* | (Grand'Croix), 2. | 1.302 | |
| *Id.* | Newcastle (Richardson) | 1.280 | |
| Houilles grasses à longues flammes | Flenu de Mons, 1. | 1.276 | — |
| *Id.* | *Id.* 2. | 1.292 | |
| *Id.* | Rive-de-Gier (Cimetière), 1. | 1.288 | |
| *Id.* | *Id.* *id.* 2. | 1.294 | — |
| *Id.* | *Id.* (Couzon), 1. | 1.298 | |
| *Id.* | *Id.* *id.* 2. | 1.314 | |
| *Id.* | Lavaysse | 1.284 | — |
| *Id.* | Lancashire (Canelcoal) | 1.317 | |
| *Id.* | Épinac | 1.353 | |
| *Id.* | Commentry | 1.319 | — |
| Houilles sèches à longues flammes | Blanzy | 1.362 | |
| *Combustibles des terrains secondaires.* | | | |
| Anthracite | Lamure | 1.362 | — |
| *Id.* | Macot | 1.919 | |
| Houille | Obernkirchen | 1.279 | |
| *Id.* | Céral | 1.294 | — |
| *Id.* | Noroy | 1 410 | |
| Jais | Saint-Girons | 1.316 | |
| *Id.* | Bélertat | 1.305 | — |
| *Combustibles des terrains tertiaires.* | | | |
| Lignite parfait | Dax | 1.272 | — |
| *Id.* | Bouches-du-Rhône | 1.254 | |
| *Id.* | Mont-Mésiner | 1.351 | |
| *Id.* | Basses-Alpes | 1.276 | — |
| Lignite imparfait | Grèce | 1.185 | |
| *Id.* | Cologne | 1.100 | |
| *Id.* | Usnach (bois fossile) | 1.167 | — |
| Lignite passant au bitume | Ellebogen | 1.157 | |
| *Id.* | Cuba | 1.197 | |
| Asphalte | » | 1.063 | — |

*admettant pour puissances calorifiques respectives de l'hydrogène en excès et du carbone* 23640 *et* 7800, *et en adoptant les puissances de Dulong* 34742 *et* 7170 (282; *les valeurs trouvées dans les deux hypothèses, et dont nous donnons la moyenne dans la dernière colonne, ne diffèrent pas d'une manière très-sensible.*

| NATURE DU COKE. | POIDS du coke. | COMPOSITION. | | | | HYDROGÈNE en excès. | PUISSANCE calorifique moyenne. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Carbone. | Hydrogène. | Oxygène et azote. | Cendres. | | |
| Pulvérulent. . . | 84.83 | 90.45 | 2.43 | 2.45 | 4.67 | 2.09 | 7382 |
| *Id.* . . . | 89.72 | 92.56 | 3.33 | 2.53 | 1.58 | 2.98 | 7798 |
| *Id.* . . . | 89.96 | 91.98 | 3.92 | 3.16 | 0.94 | 3.48 | 7807 |
| *Id.* . . . | 86.96 | 91.45 | 4.18 | 3.12 | 2.25 | 3.95 | 7998 |
| Boursouflé. . . . | 76.29 | 89.27 | 4.85 | 4.47 | 1.41 | 4.23 | 7881 |
| *Id.* . . . | 73.34 | 87.85 | 4.90 | 4.29 | 2.96 | 4.30 | 7831 |
| Très-boursouflé. . | 66.72 | 87.45 | 5.14 | 5.63 | 1.78 | 4.36 | 7644 |
| *Id.* . . . | 68.36 | 87.79 | 4.86 | 5.91 | 1.44 | 4.04 | 7678 |
| *Id.* . . . | » | 87.95 | 5.24 | 5.41 | 1.40 | 4.49 | 7894 |
| Boursouflé. . . . | » | 84.67 | 5.29 | 7.94 | 2.10 | 4.18 | 7558 |
| *Id.* . . . | » | 83.87 | 5.42 | 7.03 | 3.68 | 4.44 | 7573 |
| *Id.* . . . | 67.33 | 82.04 | 5.27 | 9.12 | 3.57 | 4.00 | 7307 |
| *Id.* . . . | 66.11 | 84.83 | 5.61 | 6.57 | 2.99 | 4.69 | 7789 |
| *Id.* . . . | 61.88 | 82.58 | 5.59 | 9.11 | 2.72 | 4.32 | 7441 |
| *Id.* . . . | 60.28 | 84.71 | 4.99 | 7.98 | 5.32 | 3.88 | 7248 |
| *Id.* . . . | 52.77 | 82.12 | 5.27 | 7.48 | 5.13 | 4.23 | 7381 |
| *Id.* . . . | 55.35 | 83.75 | 5.66 | 8.04 | 2.55 | 4.54 | 7594 |
| *Id.* . . . | 59.97 | 84.12 | 5.10 | 11,25 | 2.53 | 3.53 | 7098 |
| *Id.* . . . | 63.16 | 82.72 | 5.29 | 11.75 | 0.24 | 3.65 | 7236 |
| Fritté. . . . . | 54.72 | 76.48 | 5.23 | 16.01 | 2.28 | 3.09 | 6626 |
| Pulvérulent. . . | 89.5 | 89.77 | 1.67 | 3.99 | 4.57 | 1.49 | 7201 |
| *Id.* . . . | 88.9 | 71.49 | 0.92 | 1.12 | 26.47 | 0.79 | 5584 |
| Très-boursouflé. . | 77.8 | 89.50 | 4.83 | 4.67 | 1.00 | 4.27 | 7945 |
| Fritté. . . . . | 53.3 | 75.38 | 4.74 | 9.02 | 1.86 | 3.66 | 6716 |
| Pulvérulent. . . | 51.2 | 63.28 | 4.35 | 13.17 | 19.20 | 2.77 | 5443 |
| Fritté. . . . . | 42.5 | 72.94 | 5.45 | 17.53 | 4.08 | 3.35 | 6438 |
| *Id.* . . . | 42.0 | 75.41 | 5.79 | 17.91 | 0.89 | 3.64 | 6603 |
| Pulvérulent. . . | 49.1 | 70.49 | 5.59 | 18.93 | 4.99 | 3.32 | 6225 |
| *Id.* . . . | 44.1 | 63.88 | 4.58 | 18.11 | 13.43 | 2.41 | 5495 |
| *Id.* . . . | 48.5 | 74.71 | 4.85 | 21.67 | 1.77 | 2.25 | 6024 |
| *Id.* . . . | 49.5 | 70.02 | 5.20 | 21.77 | 3.01 | 2.59 | 5997 |
| Analogue au charbon de bois. | 38.9 | 61.20 | 5.00 | 24.78 | 9.02 | 2.03 | 5173 |
| | 36.1 | 63.29 | 4.98 | 26.24 | 5.49 | 1.83 | 5271 |
| | » | 56.04 | 5.70 | 36.07 | 2.19 | 1,38 | 4597 |
| Boursouflé. . . . | 27.4 | 73.79 | 7.46 | 13.79 | 4.96 | 5.81 | 7218 |
| *Id.* . . . | 39.0 | 75.85 | 7.25 | 12.96 | 3.94 | 5.70 | 7341 |
| *Id.* . . . | 9.0 | 79.18 | 9.30 | 8.72 | 2.80 | 8.26 | 8339 |

*POIDS moyen de l'hectolitre ras de houilles de différentes localités.*

| | kilog. |
|---|---|
| Houille de la mine de Labarthe | 88 |
| *Id.* d'Auvergne et de Blanzy | 87 |
| *Id.* de la mine de Combelle | 86 |
| *Id.* de la mine de Lataupe | 85 |
| *Id.* de la mine de Saint-Étienne | 84 |
| *Id.* de Decize | 83 |
| *Id.* du Creuzot | 79 |
| *Id.* de Mons | 80 |

M. Péclet, sans avoir fait des expériences directes pour déterminer la quantité de chaleur rayonnée dans la combustion de la houille, pense qu'elle est plus considérable que pour le charbon de bois (282).

Depuis quelques années, dans un grand nombre de bassins houillers, par un lavage, on est parvenu à priver la houille de la majeure partie des schistes, pyrites et matières terreuses qui s'y trouvent mélangés lors de l'extraction, et à obtenir ainsi une houille plus convenable pour la métallurgie et surtout pour le chauffage des locomotives.

Les lavoirs usités consistent, avec plus ou moins de modifications, en une pompe qui foule l'eau près du fond d'une caisse sur le double fond percé de trous de laquelle est placée la houille à laver. Par le soulèvement que produit le mouvement continu ou alternatif de l'eau, les matières se disposent par ordre de densité, et on peut séparer la houille des schistes qui se sont stratifiés sur le double fond de la caisse.

Depuis bien des années, M. Marsais, ingénieur, directeur des mines de Saint-Étienne, moule la houille menue, et aujourd'hui on le fait avec avantage en France et en Angleterre.

A Blanzy, on commence par laver la houille menue dans la caisse à double fond dont nous venons de parler; on retire la houille lavée pour la mettre en tas et la laisser égoutter; alors, on la concasse en grains plus petits et à peu près uniformes, en la faisant passer entre deux cylindres canelés. La houille étant ainsi préparée, on la dessèche à 200° dans des fours, et on l'imprègne à chaud de 7 à 8 pour 100 de brai (goudron de houille concentré), que l'on rend liquide en l'échauffant et que l'on fait arriver dans le four. Le mélange étant opéré dans le four, on retire la matière, que l'on place dans des moules en fonte à angles arrondis de $0^m,32$ de longueur, $0^m,16$ de largeur et $0^m,16$ de profondeur, où on la comprime sous une pression de 20000 kilog. Les péras prennent ainsi une grande dureté, qui s'accroît encore par le refroidissement, au point de devenir plus grande que pour les péras naturels.

Ces péras artificiels conviennent surtout pour les bateaux, où ils font gagner 0,2 d'espace dans les soutes; de plus, ils se transportent aisément sans déchet sensible, et ils se conservent plusieurs années sans

altération. Au moment de les utiliser, on les brise, et leurs fragments anguleux fournissent un combustible qui brûle dans de bonnes conditions, et en donnant au moins autant de chaleur que la houille.

La houille menue, outre la fabrication du coke, est encore employée pour faire des briquettes, pains de pâte de houille et de 1/15 d'argile; en France on la brûle encore sur les grilles. La proportion de houille menue est environ moitié de la quantité totale exploitée, et elle n'a presque pas de valeur; ainsi, à Saint-Étienne, le gros charbon se vend 2 fr. les 100 kil., la gaillette 1$^{f}$,25, et le menu seulement 0$^{f}$,25 à 0$^{f}$,50.

290. *Coke.* La perte de chaleur due à la carbonisation de la houille est près de la moitié de la chaleur produite par la combustion complète de la houille.

La quantité de noir de fumée qu'on peut recueillir d'un four à coke est à peu près la 30$^{e}$ partie de la houille, et le poids du coke est environ moitié de celui de la houille qui l'a produit.

La puissance calorifique du coke est moyennement de 6000 unités.

Un mètre cube de coke, tel qu'on l'emploie dans les hauts fourneaux, pèse ordinairement 400 kilog. A Paris, le coke des usines à gaz pèse de 30 à 35 kilog. l'hectolitre comble.

On carbonise la houille, soit en meules, comme on le fait pour le bois, soit en vases clos, comme dans la fabrication du gaz de l'éclairage.

Les meules ont 5 à 6 mètres de diamètre sur 1 mètre de hauteur, et l'opération dure de 40 à 48 heures. Au lieu de faire les tas circulaires, on leur donne de préférence la forme d'un demi-cylindre qui a de 10 à 20 mètres de longueur sur 2 à 3 mètres de largeur et 0$^{m}$,60 de hauteur.

En France, on carbonise la houille dans des fours circulaires, ou elliptiques, ou encore cylindriques, construits en briques. Les charges varient de 20 à 25 hectolitres de houille, et l'opération dure ordinairement 24 heures.

Dans les fours, le produit en poids est plus grand que dans les meules, et en volume il est plus petit. Dans les grands appareils, le volume du coke est ordinairement égal à celui de la houille; cependant, pour la houille grasse, le volume du coke surpasse quelquefois celui de la houille de 30 pour cent, et souvent il l'excède de 5 à 15 pour cent; mais pour la houille maigre, il est ordinairement plus petit.

Le coke fabriqué en vase clos, comme dans la préparation du gaz de l'éclairage, ne peut être employé à la métallurgie du fer.

*PERTE en poids due à la distillation de quelques houilles, d'après des expériences faites à la manufacture des tabacs*, par MM. Clément, Gueniveau et Lefroy.

| | |
|---|---|
| Houille de Blanzy (Saône-et-Loire) | 0.44 |
| Newcastle | 0.395 |
| Flenu, première variété (Mons) | 0.39 |
| Houille de Decize (Nièvre) | 0.365 |
| *Id.* des veines du Mathon et du Buisson (Belgique) | 0.36 |
| Flenu, deuxième variété | 0.355 |
| Houille dite nouvel Anzin | 0.345 |
| *Id.* de Denain | 0.325 |
| *Id.* dite ancien Anzin | 0.255 |

M. Péclet pense que la chaleur rayonnée dans la combustion du coke est plus considérable que pour le charbon de bois (282).

### AIR NÉCESSAIRE A LA COMBUSTION.

**291.** *Quantité d'air nécessaire à la combustion.* L'acide carbonique étant composé de 27,36 de carbone et de 72,64 d'oxygène, 1 kilogramme de carbone exige, pour passer à l'état d'acide carbonique, $\frac{72.64 \times 1}{27.36} = 2^{k},65$ d'oxygène, c'est-à-dire, $\frac{2.65}{1.43} = 1^{m.cu.},85$ d'oxygène à 0° et sous la pression $0^{m},76$ (un mètre cube d'air pesant $1^{k},30$, et la densité de l'oxygène étant 1.1026), ou bien $\frac{1.85 \times 100}{21} = 8^{m.cu.},81$ d'air atmosphérique à la même température et à la même pression (l'air étant composé de 21 d'oxygène pour 79 d'azote).

L'eau étant composée de 11,1 d'hydrogène et de 88,9 d'oxygène, il s'ensuit que 1 kilog. d'hydrogène exige, pour sa combustion, 8 kilog. ou $5^{m.cu.},6$ d'oxygène à 0° et sous la pression $0^{m},76$; ce qui équivaut à $26^{m.cu.},66$ d'air à la même température et sous la même pression.

Connaissant alors la quantité de carbone et celle d'hydrogène en excès que contient un combustible, il sera facile de déterminer la quantité d'air théoriquement nécessaire à sa combustion.

Comme, dans la pratique, une quantité considérable de l'air qui passe dans le foyer échappe à la combustion, il s'ensuit que pour brûler un kilogramme de combustible, il faut une quantité d'air bien plus grande que celle théoriquement nécessaire. On estime que pour le bois 1/3 de l'air qui passe dans le foyer échappe à la combustion, et que pour les autres combustibles il y en a moitié.

C'est d'après ces suppositions que M. Péclet a obtenu les résultats du tableau suivant, qui donne les quantités d'air théoriques et pratiques nécessaires à la combustion d'un kilogr. de quelques combustibles.

| DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES. | COMPOSITION. | | VOLUME D'AIR. | |
|---|---|---|---|---|
| | Carbone. | Hydrogène en excès. | Théorique. | Pratique. |
| | | | m. c. | m. c. |
| Bois parfaitement desséché. . . . . | 0,51 | 0 | 4.50 | 6.75 |
| Bois ordinaire à 0.20 d'eau. . . . . | 0.416 | 0 | 3.60 | 5.40 |
| Charbon de bois. . . . . | 0.93 | 0 | 8.20 | 16.40 |
| Tannée. . . . . | » | » | 3.50 | 7.00 |
| Tourbe parfaitement sèche. . . . . | 0,58 | 0,02 | 5.64 | 11.28 |
| Tourbe à 0.20 d'eau. . . . . | 0.464 | 0.016 | 4.51 | 9.02 |
| Charbon de tourbe (0.25 de cendres). . | 0.75 | 0.0 | 6.60 | 13.20 |
| Houille moyenne. . . . . | 0.88 | 0.05 | 9.05 | 18.10 |
| Coke à 0.15 de cendres. . . . . | 0.85 | 0.0 | 7.50 | 15.00 |

292. *Volume de gaz qui passe par la cheminée d'un foyer.* Le volume de l'acide carbonique pur étant, à la même température et à la même pression, égal à celui de l'oxygène qui l'a formé, si le combustible ne contenait que du carbone, le volume de gaz qui passerait par la cheminée serait égal au volume d'air qui arrive sur le foyer, ramené à la température de la cheminée; mais il passe aussi de la vapeur d'eau qui provient :

1° De l'eau contenue dans le combustible, et qui donne, par kilog., un volume de $1^{mc},696$ de vapeur à 100° (272), lequel, ramené fictivement à 0°, devient $\frac{1,696}{1+0,367} = 1^{mc},24$; (262).

2° De l'oxygène et de l'hydrogène dans les proportions convenables pour faire de l'eau; ainsi un kilog. de bois contenant ces deux gaz dans la proportion de 48 pour cent d'eau donnera un volume de vapeur, ramenée fictivement à 0°, égal à $1,24 \times 0,48 = 0^{m},60$. Si le bois était à 20 pour cent d'eau, ce volume de vapeur à 0° serait $1,24(0,20 + 0,48 \times 0,80) = 0^{mc},72$; la tannée donne à peu près le même résultat;

3° De l'hydrogène en excès. 1 kilog. d'hydrogène exigeant 8 kilog. d'oxygène pour se brûler, c'est-à-dire pour se convertir en eau (291), il en résulte que chaque kilog. d'oxygène brûlé donnera $1^{k},125$ de vapeur d'eau, ou $1,24 \times 1,125 = 1^{mc},4$ environ de vapeur ramenée fictivement à 0°. Comme 1 kilog. d'oxygène à 0° et sous la pression $0^{m},76$ occupe un volume de $0^{mc},70$ (45), il en résulte que chaque kilog. d'oxygène converti en vapeur donnera une augmentation de volume à 0° de $1,4 - 0,7 = 0^{mc},7$; ce qui fait voir que l'augmentation de volume est égale au volume de l'oxygène brûlé, ou encore que le volume de vapeur produit est double de celui de l'oxygène. La tourbe complétement desséchée contenant encore 0,30 de son poids d'eau et 0,02 d'hydrogène en excès, l'augmentation de volume due à la vapeur d'eau, rame-

née fictivement à 0°, sera, par kilog. de tourbe, $0{,}30 \times 1{,}24 + 0{,}02 \times 8 \times 0{,}7 = 0^{mc},48$. En suivant une marche analogue, on déterminerait cette augmentation pour 1 kilogramme d'un combustible quelconque dont on connaît la composition; c'est ainsi qu'a été formé le tableau suivant.

*TABLEAU donnant, pour un kilogramme de quelques combustibles : 1° le volume d'air à 0°, qui passe par le foyer pour opérer la combustion d'un kilogramme de ces combustibles ; 2° le volume de vapeur provenant des causes qui viennent d'être citées, ramené fictivement à 0° ; 3° le volume total de gaz qui passe par la cheminée ; 4° le volume total de gaz qui passe par la cheminée, en faisant le coefficient de dilatation des gaz égal à 0.00367 (262), et la température $t = 300°$ (température ordinaire des gaz dans la cheminée), ce qui donne $1 + at = 2{,}1$.*

| DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES. | AIR froid. | VAPEUR à 0°. | VOLUME DE GAZ dans la cheminée, la température dans la cheminée étant | |
|---|---|---|---|---|
| | | | $t$ = valeur quelconque. | $t = 300°$. |
| | m. c. | m. c. | m. c. | m.c. |
| Bois parfaitement desséché. . . | 6.75 | 0.60 | 7.35 $(1 + at)$ | 15.43 |
| Bois ordinaire à 0.20 d'eau. . . . | 5.40 | 0.72 | 6.12 $(1 + at)$ | 12.85 |
| Charbon de bois. . . . . | 16.40 | 0.0 | 16.40 $(1 + at)$ | 34.44 |
| Tourbe desséchée. . . . . | 11.25 | 0.48 | 11.73 $(1 + at)$ | 24.63 |
| Tourbe ordinaire.. . . . . | 9.02 | 0.63 | 9.65 $(1 + at)$ | 20.26 |
| Charbon de tourbe.. . . . . | 13.20 | 0.0 | 13.20 $(1 + at)$ | 27.72 |
| Houille moyenne. . . . . | 18.10 | 0.34 | 18.44 $(1 + at)$ | 38.72 |
| Coke à 0.15 de cendres. . . . . | 15.00 | 0.0 | 15.00 $(1 + at)$ | 31.50 |

Les nombres de ce tableau supposent que tout le combustible est brûlé; mais comme, dans la pratique, une partie du combustible tombe de la grille et échappe à la combustion, ainsi pour les houilles on obtient de 10 à 20 pour cent de résidu, on doit considérer ces nombres comme étant des maximums qui donneront toujours des résultats suffisants dans le calcul des dimensions de la cheminée. Des expériences faites à Wesserling, sur une même chaudière à vapeur, ont donné un volume de gaz sortant par la cheminée égal à $6(1 + at)$ pour le bois, et à $16(1 + at)$ pour la houille à 0,16 de résidu.

## CHEMINÉES.

**293.** *Mouvement de l'air chaud dans un tuyau vertical.* Négligeant les frottements de l'air contre les parois du tuyau, si l'on considère la couche d'air chaud qui sort du tuyau, elle est pressée de haut en bas par la pression atmosphérique comptée à partir du haut du tuyau, et de bas en haut par la pression atmosphérique comptée à partir du bas

du tuyau, diminuée du poids de la colonne verticale d'air chaud contenue dans le tuyau; elle est donc en définitive sollicitée de bas en haut par la différence de poids de deux colonnes égales à la hauteur verticale H du tuyau, l'une d'air froid et l'autre d'air chaud; or cette différence est évidemment égale au poids d'une colonne d'air chaud égale à la dilatation de H, c'est-à-dire d'une colonne égale à

$$\frac{Ha(t'-t)}{1+at} \quad \text{ou à peu près} \quad Ha(t'-t); \qquad (262)$$

on a donc

$$v = \sqrt{2gHa(t'-t)}. \qquad (212)$$

H hauteur verticale du tuyau dans lequel circule l'air chaud;
$a = 0.00367$ coefficient de dilatation de l'air (261);
$t'$ température moyenne de l'air dans le tuyau, et que nous supposerons constante sur toute la longueur du tuyau;
$t$ température de l'air extérieur;
$v$ vitesse avec laquelle l'air chaud s'écoule par l'orifice supérieur du tuyau.

100 parties d'air contenant 79 d'azote et 21 d'oxygène, comme le volume de l'acide carbonique est égal au volume de l'oxygène qui l'a formé, et que les densités de l'azote et de l'acide carbonique sont respectivement 0,972 et 1,524, la densité de l'air entièrement brûlé est donc $\frac{0,972\times 79+1,524\times 21}{100}=1,088$. Supposant que dans nos foyers la moitié de l'air échappe à la combustion, il en résulte que la densité des gaz qui s'échappent dans la cheminée est $\frac{1+1,088}{2}=1,044$, densité qui diffère trop peu de celle de l'air, qui est 1, pour qu'on ne puisse les supposer égales, et prendre pour vitesse ascensionnelle de la fumée dans les cheminées, celle fournie par la formule précédente.

Le frottement contre les parois du tuyau ou de la cheminée est considérable, et en admettant que les gaz chauds se comportent comme les gaz froids (213), on peut poser, pour un tuyau vertical,

$$P-p=n'\frac{Hv^2}{D}. \qquad (a)$$

$P=Ha(t'-t)$ pression qui produit l'écoulement du gaz au bas du tuyau, estimée par une colonne d'air chaud; c'est la pression nécessaire pour vaincre les frottements du gaz dans le tuyau et produire l'écoulement de ce gaz (P est représenté par H au n° 213).

$p=\frac{v^2}{2g}$ pression qui produit la vitesse effective $v$, avec laquelle le gaz sort du tuyau; $p$ est aussi estimé en air chaud ($p$ est représenté par $h$ au n° 213);

$P-p$ perte de pression ascensionnelle due au frottement;

D diamètre du tuyau, ou côté du canal si la section est carrée; cela est indifférent, vu que le rapport de la section au périmètre est le même pour le cercle que

pour le carré circonscrit, et que le frottement est proportionnel au contour de la section et en raison inverse de cette section;

$n'$ coefficient constant pour une même nature de cheminée, et qui est égal, d'après M. Péclet,

à 0.0127 pour les cheminées en poterie;
à 0.005 pour les cheminées en tôle;
à 0.0025 pour les cheminées en fonte;
et à 0.0025 pour toutes les cheminées tapissées de suie.

Dans cette formule $v$ est la vitesse à l'extrémité de la conduite, au lieu d'être la vitesse moyenne (213); du reste, dans le cas des cheminées, ces deux vitesses peuvent être considérées comme étant égales quand leur différence dépend seulement de la variation de pression, mais non d'un échauffement direct des gaz.

Si le canal était incliné ou faisait des circuits, on aurait, en négligeant l'influence des coudes, ce que l'on peut généralement faire dans ce cas (n° 213, page 247),

$$P - p = n' \frac{Lv^2}{D}. \qquad (b)$$

$P = Ha\ (t' - t)$, H étant la hauteur verticale du canal;
L développement total du canal.

Si l'air circulait froid dans une portion de la conduite et chaud dans l'autre, la perte de force ascensionnelle se composerait de la perte dans chaque portion de la conduite, et on aurait

$$P - p = n' \frac{L'v^2}{D\delta} + n' \frac{L''v^2}{D}.$$

$P = Ha\ (t' - t)$, H étant la hauteur verticale de la partie L'' de la conduite;
L' développement du circuit d'air froid;
L'' développement du circuit d'air chaud;

$v'^2 = \frac{v^2}{\delta^2}$ vitesse de l'air froid dans la partie L' de la conduite; $\delta$ est le rapport de la densité de l'air froid à celle de l'air chaud; comme la partie de $P - p$ correspondant à L' serait exprimée en air froid, on la convertit en air chaud en multipliant par $\delta$; c'est pourquoi on a simplement remplacé $v'^2$ par $\frac{v^2}{\delta}$ dans le premier terme du second membre de l'équation précédente. Si le diamètre de la conduite d'air froid, au lieu d'être D, était $d$, on aurait $v'^2 = \frac{v^2}{\delta^2} \times \frac{D^5}{d^5}$.

Supposant le diamètre de la conduite constant sur toute sa longueur, la formule précédente devient

$$P - p = n' \frac{v^2}{D} \left( \frac{L'}{\delta} + L'' \right). \qquad (c)$$

Remplaçant, dans les formules précédentes $(a)$, $(b)$ et $(c)$, $p$ par sa valeur $\frac{v^2}{2g}$, elles donnent respectivement :

$$v = \sqrt{\frac{2g\mathrm{PD}}{\mathrm{D} + 2gn'\mathrm{H}}}, \quad (a') \qquad v = \sqrt{\frac{2g\mathrm{PD}}{\mathrm{D} + 2gn'\mathrm{L}}}, \quad (b')$$

$$v = \sqrt{\frac{2g\mathrm{PD}}{\mathrm{D} + 2gn'\left(\frac{\mathrm{L}'}{\delta} + \mathrm{L}''\right)}}. \quad (c')$$

M. Péclet a reconnu par expérience que la formule $(b')$ se vérifiait d'une manière satisfaisante.

Pour une cheminée verticale rétrécie à sa partie supérieure, la formule $(a)$ devient, en remarquant que la résistance due au frottement est proportionnelle au carré de la vitesse, et par conséquent en raison inverse du carré de la section,

$$\mathrm{P} - p = n' \frac{\mathrm{H}v^2}{\mathrm{D}} \times \frac{s^2k^2}{\mathrm{S}^2};$$

d'où l'on tire, en faisant $p = \frac{v^2}{2g}$,

$$v = \sqrt{\frac{2g\mathrm{PDS}^2}{\mathrm{DS}^2 + 2gn'\mathrm{H}s^2k^2}}. \quad (a'')$$

S section de la cheminée ;
$s$ section de l'orifice d'écoulement ;
$k$ coefficient de la dépense (212).

Si on suppose $\frac{\mathrm{S}}{s}$ très-grand, on pourra négliger $2gn'\mathrm{H}s^2k^2$ près de $\mathrm{DS}^2$, et la formule précédente donnera

$$v = \sqrt{2g\mathrm{P}};$$

c'est-à-dire que le frottement sera nul, et la vitesse de sortie par l'orifice sera égale à la vitesse théorique. On obtient à peu près la vitesse maxima, quand le diamètre de la cheminée est égal à 2 ou 3 fois celui de l'orifice ; au-dessus de cette limite, la vitesse n'augmente plus que d'une manière presque insensible.

Pour une cheminée rétrécie à la partie supérieure et sinueuse, la formule $(b')$ devient, d'après les considérations qui ont servi à établir la formule $(a'')$,

$$v = \sqrt{\frac{2g\mathrm{PDS}^2}{\mathrm{DS}^2 + 2gn'\mathrm{L}s^2k^2}}, \quad (b'')$$

et la formule $(c')$,

$$v = \sqrt{\frac{2g\mathrm{PDS}^2}{\mathrm{DS}^2 + 2gn's^2k^2\left(\frac{\mathrm{L}'}{\delta} + \mathrm{L}''\right)}}. \qquad (c'')$$

*Cheminée rétrécie à la partie inférieure.* D'après les expériences de M. Péclet, une cheminée circulaire en fonte de 17 mètres de hauteur, et de $0^m,0314$ de section ou de $0^m,20$ de diamètre, ayant fonctionné d'abord tout ouverte, et ensuite fermée successivement à la partie inférieure par des plaques portant des orifices circulaires de $0^m,11$, $0^m,055$ et $0^m,0275$ de diamètre, les vitesses $v$ observées ont été respectivement $4^m,73$, $2^m,84$, $1^m,70$ et $0^m,81$.

Dans ces expériences la vitesse théorique $v = \sqrt{2g\mathrm{H}a(t'-t)}$, due à la colonne d'air chaud, était $10^m,74$, et la résistance $\mathrm{P}-p$, due au frottement, $0{,}21v^2$.

De ces mêmes expériences, il résulte que, pour une même cheminée, la vitesse dans le rétrécissement inférieur est d'autant plus grande que le diamètre de ce rétrécissement est plus petit. Dans la dernière des expériences qui viennent d'être citées, la section de la cheminée était $0^{mc},0314$, et celle de l'orifice circulaire d'entrée, $0^{mc},0006$, d'où il résulte que la vitesse de la fumée dans la cheminée ayant été $0^m,81$, dans l'orifice inférieur elle était $\frac{0{,}81 \times 0{,}0314}{0{,}0006} = 42^m,39$, c'est-à-dire à peu près égale à 4 fois celle $10^m,74$, due à la colonne d'air chaud contenue dans la cheminée.

La vitesse dans l'étranglement augmente encore quand on raccorde l'orifice avec la cheminée par une partie évasée.

On n'a pas encore donné d'expression analytique de la résistance qui résulte d'un étranglement brusque; seulement, M. Péclet a conclu de ses expériences :

1° Que dans une conduite d'air, la perte de hauteur motrice produite par un étranglement est beaucoup plus petite que la hauteur qui correspond à la différence des vitesses dans et après l'étranglement;

2° Que la perte réelle est un peu plus grande que la différence des hauteurs correspondant aux vitesses, multipliée par le rapport de la surface de l'orifice à celle du canal qui suit l'étranglement;

3° Que le rélargissement brusque d'un canal, du moins dans une certaine étendue et dans une certaine limite, a peu d'influence.

**294.** *Maximum de tirage des cheminées.* La vitesse effective de l'air dans une cheminée peut être mise sous la forme

$$v = \sqrt{\frac{2g}{m}\mathrm{H}a(t'-t)},$$

ou plus simplement

$$v = \sqrt{\frac{\mathrm{H}a(t'-t)}{\mathrm{M}}}.$$

$v$, H, $a$, $t'$ et $t$ ont les mêmes significations qu'au n° 293 ;
$m$ et M sont des nombres constants pour une même cheminée, mais qui varient suivant la nature, la forme et les dimensions des cheminées.

Désignant par V le volume d'air écoulé en une seconde par une cheminée carrée dont le côté est D, on a, en conservant les mêmes annotations qu'au n° 293,

$$V = D^2 v = D^2 \sqrt{\frac{Ha(t'-t)}{M}};$$

et si l'on désigne par $Q_1$ le poids de ce volume d'air, on aura

$$Q_1 = D^2 \sqrt{\frac{Ha(t'-t)}{M}} \times \frac{1^k,3}{1+at'} = 1^k,3D^2 \sqrt{\frac{Ha}{M} \times \frac{t'-t}{(1+at')^2}}.$$

$1^k.3$ poids d'un mètre cube d'air à 0° et sous la pression $0^m.76$ (44) ;
$\frac{1^k.3}{1+at'}$ poids d'un mètre cube d'air à la température de la cheminée (262).

La dernière expression de la valeur de $Q_1$ fait voir que, pour une valeur déterminée de H, cette dépense est maximum quand $\frac{t'-t}{(1+at')^2}$ est maximum ; ce qui a lieu, d'après les règles du calcul différentiel, quand on a $t' = \frac{1}{a} + 2t = 273 + 2t$ ; ainsi, en supposant $t = 0°$, le maximum de tirage correspond à $t' = 273°$ ; si $t = 12°$, ce qui a lieu moyennement, le maximum de tirage correspond à $t' = 297°$, soit, pour la pratique, $t' = 300°$.

M. Péclet, en supposant $t = 0°$, a dressé un tableau des valeurs de $\sqrt{\frac{t'}{(1+at')^2}}$ correspondant aux différentes valeurs de $t'$.

De ce tableau, il résulte que quand $t = 0°$, le tirage d'une cheminée reste à peu près constant pour des valeurs de $t'$ comprises entre 250° et 300°, et qu'il varie très-peu pour des valeurs de $t'$ comprises entre 210° et 350°.

Supposant $t' = 297°$ et $t = 12°$, on a $\sqrt{\frac{t'-t}{(1+at')^2}} = 8,1$, et l'effet maximum produit par le tirage de la cheminée peut être mis sous la forme

$$1,3 \times D^2 \times 8,1 \sqrt{\frac{Ha}{M}} = 0,63 D^2 \sqrt{\frac{H}{M}}.$$

**293.** *Dimensions des cheminées et des carneaux.* En appelant L' le développement du canal de fumée depuis le foyer jusqu'au pied de la cheminée, D le diamètre de ce canal, que l'on suppose être aussi celui de la cheminée, on a, d'après la formule ($b'$), n° 293, en conservant

les mêmes annotations que dans ce numéro et en remplaçant P par $Ha(t'-t)$,

$$v = \sqrt{\frac{2gHa(t'-t)D}{D+2gn'(L'+H)}}.$$

Cette formule fait voir que la vitesse ascensionnelle de la fumée est d'autant plus grande que H est plus grand; rarement, pour les cheminées d'usines, H a moins de 12 mètres et plus de 30 mètres.

Pour une cheminée ordinaire de chaudière à vapeur, la perte de pression due aux différentes causes qui diminuent le tirage peut être exprimée, d'après la formule (*b*), n° 293, par

$$P - p = P - \frac{v^2}{2g} = n'\frac{Lv^2}{D} + Rv^2;$$

d'où l'on tire

$$v = \sqrt{\frac{2gPD}{D+2gn'L+2gRD}} \quad \text{(formule (b'), n° 293).}$$

L longueur du canal de diamètre D qui produirait la même résistance que la totalité du circuit de la fumée depuis le foyer jusqu'en haut de la cheminée; pour les chaudières à vapeur, la section des carneaux étant égale à celle de la cheminée, il en résulte que L est égale à la totalité de ce circuit;

$n'\frac{Lv^2}{D}$ perte de pression due au frottement de la fumée contre les parois des carneaux de la cheminée;

$Rv^2$ somme des résistances dues au passage de l'air dans le foyer. D'après M. Péclet, les foyers étant bien construits et ayant un décimètre carré de surface de grille pour 1k ou 1k.2 de houille à brûler par heure, on a, en tenant une épaisseur de 6 à 8 centimètres de houille sur la grille, R = 0,61, et par suite $2gR = 12$.

Comme on a $n' = 0{,}0025$ pour une cheminée quelconque tapissée de suie (293), on a donc

$$v = \sqrt{\frac{2gPD}{13D+0{,}05L}}. \qquad (a)$$

Soit maintenant V le volume d'air chaud qui doit s'écouler par la cheminée en une seconde; on a

$$V = \frac{QV_1(1+0{,}003\,67t')}{3600}. \qquad (b)$$

Q poids du combustible à brûler par heure;

$V_1$ volume d'air froid nécessaire à la combustion d'un kilogramme de combustible (291).

On a aussi, en supposant la cheminée carrée,

$$V = vD^2;$$

où, en remplaçant $v$ par sa valeur $(a)$,

$$V = \sqrt{\frac{2gPD^5}{13D + 0{,}05L}};$$

d'où l'on tire

$$D^5 = \frac{V^2(13D + 0{,}05L)}{2gP}. \qquad (c)$$

Dans cette équation, tout est connu à l'exception de D, dont on pourra alors tirer la valeur. Pour y arriver, on néglige le terme 0,05L dans l'équation précédente, ce qui donne

$$D^4 = \frac{13V^2}{2gP}. \qquad (d)$$

De cette nouvelle équation on tire une première valeur de D; on la substitue dans le second membre de l'équation $(c)$, de laquelle on tire une deuxième valeur de D plus exacte que la première, et qu'on peut adopter dans la pratique; cependant, si l'on voulait plus d'exactitude encore, on placerait cette deuxième valeur de D dans le second membre de l'équation $(c)$, qui fournirait une troisième valeur de D plus exacte encore que la deuxième, sans cependant en différer d'une manière sensible. En continuant ainsi de suite, les valeurs de D se rapprocheraient de plus en plus de la valeur satisfaisant à l'équation $(c)$.

*Application.* Soit à déterminer le côté D de la section d'une cheminée carrée de 15 mètres de hauteur, le circuit total de la fumée ayant 50 mètres de développement et une section constante, et la quantité de houille brûlée par heure étant de 80 kilog.

Supposant $t' = 297°$ et $t = 12°$, on a

$$P = 15 \times 0{,}003\,67(297 - 12) = 15^m{,}62, \qquad (293)$$

et la vitesse théorique $\sqrt{2gP} = 17^m{,}50$.

On a $V_1 = 18^{mc}{,}44$, et la formule $(b)$ donne

$$V = \frac{80 \times 18{,}44(1 + 0{,}003\,67 \times 297)}{3600} = 0^{mc}{,}854.$$

La formule $(d)$ donne alors

$$D = \sqrt[4]{\frac{13 \times 0{,}854 \times 0{,}854}{2 \times 9{,}8088 \times 15{,}62}} = 0^m{,}42. \qquad (1^{re})$$

Substituant cette première valeur de D dans l'équation $(c)$, on a

$$D = \sqrt[5]{\frac{0{,}854 \times 0{,}854(13 \times 0{,}42 + 0{,}05 \times 50)}{2 \times 9{,}8088 \times 15{,}62}} = 0^m{,}453. \qquad (2^e)$$

Remplaçant $0^m,42$ par $0^m,453$ dans cette équation, on en tirerait $D = 0^m,458$, troisième valeur sensiblement égale à la deuxième.

Supposant toujours $t' = 297°$, $t = 12°$ et le poids de houille à brûler par heure égal à 80 kilog., on trouve, en supposant constant et égal à 35 mètres l'espace que parcourt la fumée avant d'entrer dans la cheminée, mais en faisant varier la hauteur de la cheminée, les résultats du tableau suivant.

| DÉSIGNATION DES RÉSULTATS. | HAUTEUR DE LA CHEMINÉE. | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 10m. | 15m. | 20m. | 25m. | 30m. |
| Circuits entiers de la fumée. . . . . | 45m | 50m | 55m | 60m | 65m |
| Valeurs de $P = Ha\,(t' - t)$. . . . . | 10.41 | 15.62 | 20.82 | 26.03 | 31.23 |
| Vitesses théoriques $\sqrt{2gP}$. . . . . | 14.29 | 17.50 | 20.21 | 22.60 | 24.75 |
| Vitesses pratiques $\frac{V}{D^2} = \frac{0^m.854}{D^2}$. . . . | 3.49 | 4.16 | 4.71 | 5.16 | 5.55 |
| Rapport de ces vitesses. . . . . | 4.10 | 4.20 | 4.29 | 4.38 | 4.46 |
| Deuxièmes valeurs de D. . . . . | 0.495 | 0.453 | 0.426 | 0.407 | 0.392 |
| Sections $D^2$ en décimètres carrés. . . | 24.50 | 20.52 | 18.15 | 16.57 | 15.37 |
| Poids de houille brûlés par heure et par décim. carré de section des cheminées. | 3k 27 | 3k.90 | 4k.41 | 4k.83 | 5k.20 |

La formule (*c*) donne des résultats qui s'accordent bien avec les dimensions des cheminées des chaudières à vapeur qui donnent le plus d'effet utile. Il vaut mieux augmenter un peu les résultats donnés par cette formule que de les diminuer, on obtient un excès de tirage qu'on modère avec le registre; mais, comme généralement la cheminée va en se rétrécissant de bas en haut, il suffit de prendre pour sa section en haut les résultats que donne la formule.

Il sera facile de modifier les résultats du tableau précédent pour la généralité des cas qui pourront se présenter dans la pratique, et éviter de faire les calculs qu'exigent les formules (*d*) et (*c*).

Pour une cheminée ordinaire d'appartement, l'expérience prouve qu'une section de 3 à 4 décimètres carrés est presque toujours suffisante (332).

**296.** *Cheminées communes à plusieurs foyers.* Lorsqu'une cheminée sert pour plusieurs foyers, on fait sa section égale à la somme des sections des cheminées de tous les foyers en particulier; la section ainsi obtenue est un peu grande, mais l'excès de tirage qui en résulte est très-avantageux.

**297.** *Température de l'air sortant du foyer, et perte de chaleur due à la température de l'air dans la cheminée.*

La température de l'air sortant du foyer est donnée par la formule

$$T = \frac{E \times 4}{V \times 1{,}3}.$$

T température des gaz sortant du foyer;
E puissance calorifique du combustible (282);
4 rapport approché de la capacité calorifique de l'eau à celle de l'air (267);
V volume de fumée ramené à 0° produit par un kilogramme de combustible (292); la formule suppose la capacité calorifique de la fumée égale à celle de l'air;
1k.3 poids d'un mètre cube d'air ou de fumée à 0° (44).

La perte de chaleur due à la température que conserve l'air en arrivant à la cheminée est, pour 1 kilogramme de combustible,

$$P = E \frac{t'}{T}.$$

P perte de chaleur en unités (265);
$t'$ température de l'air dans la cheminée;

Des deux formules précédentes, on conclut les résultats du tableau suivant. Ces résultats supposent la température de l'air extérieur égale à 0°, et la température de la fumée dans la cheminée égale à 300°.

| DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES. | PUISSANCE calorifique. | VOLUME de gaz et de vapeur produit. | TEMPÉRATURE de la fumée sortant du foyer. | PERTE de chaleur P par la cheminée. |
|---|---|---|---|---|
| | unités. | m.c. | | unités. |
| Bois parfaitement sec. . . . . | 3600 | 7.35 | 1507° | 717 |
| Bois ordinaire à 0.20 d'eau. . . . . | 2800 | 6.12 | 1408 | 597 |
| Houille moyenne. . . . . | 7500 | 18.44 | 1251 | 1798 |
| Coke à 0.15 de cendres. . . . . | 6000 | 15.00 | 1231 | 1462 |
| Tourbe complétement desséchée. . | 4800 | 11.73 | 1259 | 1144 |
| Tourbe ordinaire à 0.20 d'eau. . . | 3600 | 9.65 | 1148 | 941 |
| Charbon de bois. . . . . | 7000 | 16.40 | 1313 | 1599 |

Ce tableau fait voir que la chaleur que la fumée emporte dans la cheminée est le 1/4 environ de la chaleur totale développée par le combustible.

**298.** *Construction des cheminées.* Quand les cheminées en briques sont basses, on peut les faire prismatiques à l'intérieur, en ne donnant un fruit qu'à leurs parements extérieurs; quand elles sont très-élevées, on leur donne une forme pyramidale à l'intérieur et à l'extérieur.

L'épaisseur des grandes cheminées d'usines est ordinairement de $0^m,11$, la largeur d'une brique, à la partie supérieure; la pente intérieure est de $0^m,015$ à $0^m,018$ par mètre, et la pente extérieure de $0^m,024$ à $0^m,030$. Comme l'épaisseur de la maçonnerie va en diminuant à mesure qu'on s'élève, afin de ne pas tailler les briques, on construit la cheminée pyramidale à l'extérieur, et on rachète le fruit intérieur par des ressauts brusques de $0^m,11$.

Lorsque la température de la fumée ne dépasse pas 300°, on peut faire les cheminées en briques ordinaires reliées par un mortier de chaux et de sable fin ; le plâtre ne doit être employé que pour des températures inférieures à 100°. Si la température de la fumée atteint 500°, le parement intérieur de la cheminée doit être en briques réfractaires, surtout à la partie inférieure.

Actuellement, on construit les cheminées sans échafaudages extérieurs, qui étaient coûteux ; à mesure qu'on s'élève, on encastre dans la maçonnerie, à l'intérieur, des barres de fer espacées de $0^m,60$, formant une échelle qui sert à la construction et aux réparations. Un bon ouvrier, servi par un manœuvre qui lui passe les briques et le mortier, élève une cheminée ordinaire en quelques semaines.

**299.** *Tirage produit par un ventilateur.* Aux bains Vigier, la fumée, après avoir circulé autour de la chaudière, passe simultanément dans douze petits tubes de 20 mètres de longueur plongés dans l'eau froide qui doit servir à alimenter la chaudière. La fumée, en sortant de ces tubes, dans lesquels elle se refroidit complétement, est foulée dans la cheminée par un ventilateur qui a $0^m,80$ de diamètre et $0^m,40$ de largeur ; le tuyau d'écoulement a $0^m,20$ de diamètre. Ce ventilateur, mu par un seul homme, fait 40 tours par minute, et suffit à l'appel de la fumée provenant de 0,44 stère de bois pelard, pesant 171 kilogrammes, brûlés en deux heures ; ce qui fait par heure 85 kilog. qui équivalent à peu près à 42 kilog. de houille. Supposant que le tirage à l'air chaud absorbe le 1/4 de la chaleur totale développée par le combustible, un homme, dans les circonstances défavorables que nous venons de citer, a donc produit l'effet de $\frac{42}{4} = 10^k,5$ de houille, qui correspondent à la force de 2,5 chevaux-vapeur ou de 17 hommes.

Dans une brasserie de Louvain, un ventilateur absorbant l'effet de 6 chevaux suffit en une heure à la combustion de 1000 kilog. de houille, dont le 1/4, c'est-à-dire 250 kilog., serait absorbé par le tirage à l'air chaud ; dans ce cas, 6 chevaux en remplacent donc de 50 à 60.

Pour un cheval-vapeur, on brûle en 10 heures à peu près 40 kilog. de houille, qui coûtent 2 fr. à Paris ; un *homme-vapeur* pendant 10 heures coûte donc $\frac{2}{7} = 0^f,30$ ; comme il faut 2 hommes vivants pour un travail journalier de 10 heures, ce travail coûterait donc 4 fr. environ à Paris, c'est-à-dire autant que celui de 2 chevaux-vapeur, ou que 14 fois celui d'un *homme-vapeur*. Cela suppose toutefois qu'on néglige l'entretien de la machine, l'intérêt des frais d'établissement et l'amortissement de ces frais ; du reste, ces causes de dépense sont peu de chose quand la force est prise sur une machine qui commande déjà d'autres appareils.

**300.** *Tirage produit par un jet de vapeur.* On n'a pas encore fait

d'expériences pour déterminer le rapport entre le travail développé par un jet de vapeur qui se dégage suivant l'axe d'un tuyau ouvert par les deux bouts, et celui absorbé par le poids d'air qu'il met en mouvement; mais il est probable que tout le travail dépensé par la vapeur est utilisé pour imprimer le mouvement à l'air et vaincre le frottement contre les parois du tuyau. $v$ étant la vitesse de la vapeur à l'origine du tuyau et $v'$ sa vitesse à la sortie, le travail dépensé par un poids P de vapeur est

$$\frac{P(v^2 - v'^2)}{2g}. \qquad (31)$$

Ce mode de tirage est employé dans les machines locomotives. La fumée en sortant du foyer traverse simultanément, pour se rendre à la cheminée, de 80 à 170 tubes de $0^m,04$ à $0^m,054$ de diamètre intérieur et de $2^m,10$ à $2^m,75$ de longueur. Le diamètre de la cheminée varie de $0^m,32$ à $0^m,35$, d'où il résulte que le volume d'air qui passe en une seconde par la cheminée variant de 3,72 à 8 mètres cubes, la vitesse d'écoulement varie de 45 à 83 mètres par seconde, au lieu de 2 à 3 mètres qu'elle pourrait être par le simple tirage de la cheminée (294).

D'après MM. Flachat et Petiet, en négligeant les frottements de l'air dans la cheminée, le travail produit par le jet de vapeur n'est que de la 1/2 au 1/6 du travail total qu'il pourrait produire.

## FOYERS.

**301.** *Dimensions des différentes parties d'un foyer* (fig. 63 et 64, n° 304). L'ouverture du cendrier doit être assez grande pour laisser passer l'air froid nécessaire à la combustion; elle doit être au moins égale à la section des carneaux, et il convient, pour ne pas brûler de combustible inutilement, de la garnir d'une porte que l'on ferme pendant les heures de repos (295).

Les barreaux des grilles ont ordinairement de $0^m,03$ à $0^m,024$ de largeur, et ils sont espacés entre eux de $0^m,01$ à $0^m,008$; quelquefois cette épaisseur est réduite à $0^m,015$, avec toujours 1/4 environ d'espace libre. Les combustibles qui se divisent sur la grille exigent des intervalles très-faibles entre les barreaux.

Les barreaux en fer sont rectangulaires, et souvent carrés; ceux en fonte sont plus larges en haut qu'en bas, afin que, malgré leur plus grande hauteur, qui atteint de $0^m,08$ à $0^m,10$ au milieu pour des barreaux de 1 mètre de longueur, la grille ne s'encrasse pas. Les barreaux en fonte ont un peu la forme d'un solide d'égale résistance (232); ainsi, des barreaux ayant de $0^m,08$ à $0^m,10$ de hauteur au milieu n'auraient que de $0^m,05$ à $0^m,06$ aux extrémités, mais avec une épaisseur supérieure uniforme. Des petites saillies latérales venues aux extrémités

des barreaux, ainsi qu'au milieu quand ils sont longs, en maintiennent l'écartement.

La surface des grilles est de 1 décimètre carré pour 1 kilog. ou 1,2 kilog. de houille à brûler par heure; cependant on va à $1^k,5$ et même à 2 kilog. sans que l'effet en soit sensiblement diminué. Pour quelques grilles, cette consommation a été réduite jusqu'à $0^k,3$; mais alors il faut que le tirage à travers la grille soit faible, comme, par exemple, sous les chaudières en plomb. D'après quelques résultats obtenus, on peut admettre que les grandes grilles sont favorables à l'effet produit par le combustible, mais il est plus difficile d'en obtenir un feu d'une intensité uniforme (307).

L'épaisseur de houille sur la grille varie de $0^m,05$ à $0^m,08$, suivant qu'elle est plus ou moins menue. Pour les combustibles qui ne donnent pas de flamme, comme le coke et les houilles sèches, dont la consommation par heure varie de $0^k,6$ à $0^k,75$ par décimètre carré de surface de grille, l'épaisseur de la couche de combustible sur la grille varie de $0^m,20$ à $0^m,30$. Dans les locomotives, où le tirage est très-grand, chaque décimètre carré de surface de grille brûle environ $4^k,30$ de coke par heure. Pour le bois, la surface de la grille est de 3 décimètres carrés par 10 kilog. de bois à brûler par heure.

Pour la houille, la distance entre la grille et la chaudière varie de $0^m,30$ à $0^m,35$, et elle atteint $0^m,40$ et même $0^m,45$ pour les grands foyers; pour la tourbe, cette distance est de $0^m,50$; pour le coke, elle est de $0^m,60$, et pour le bois, de $0^m,60$ à $0^m,75$.

Les portes de foyer ont de $0^m,25$ à $0^m,30$ de hauteur, avec une largeur seulement suffisante pour pouvoir facilement charger et tisonner la grille. La distance de la porte au devant de la grille varie de $0^m,30$ à $0^m,45$, suivant les dimensions du foyer.

**302.** *Foyers fumivores.* Le combustible placé sur la grille doit être complétement brûlé, c'est-à-dire transformé en acide carbonique, et cela avec le moins d'oxygène possible. Ce résultat est très-important, tant sous le rapport de l'économie du combustible, que sous celui de la suppression de cette fumée épaisse que produit un foyer mal gouverné, et qui est si incommode, surtout dans les grands centres de population. On conçoit alors que la recherche d'un foyer fumivore a dû occuper bien des savants et praticiens. On a essayé un grand nombre de dispositions, dont quelques-unes ont donné des résultats que l'on peut considérer, eu égard à la difficulté du problème, comme assez satisfaisants; mais tant que l'expérience n'aura pas prononcé d'une manière définitive, que l'on n'oublie pas qu'un chauffeur intelligent, en chargeant convenablement et à propos, peut rendre à peu près fumivore un foyer ordinaire; c'est ce qui résulte de l'instruction suivante, rédigée par le conseil d'hygiène et de salubrité du département de la Seine, et notifiée à tous les propriétaires de chaudières à vapeur de ce département.

*Instruction sur les moyens d'empêcher la production de la fumée et d'en opérer la combustion.*

Depuis la promulgation de l'ordonnance de police du 11 novembre 1854, rendue sur l'avis du Conseil d'Hygiène publique et de Salubrité, et portant que, dans un délai de six mois, les propriétaires d'usines où l'on fait usage d'appareils à vapeur, seront tenus de brûler la fumée produite par les fourneaux de ces appareils ou de les alimenter avec des combustibles qui ne donnent pas plus de fumée que le coke ou le bois, plusieurs usiniers, auxquels ladite ordonnance est applicable, se sont adressés à l'Administration pour lui demander l'indication des moyens à employer afin de satisfaire à ses prescriptions. Quelques-uns d'entre eux ajoutent qu'ils ont fait, à diverses époques, des tentatives pour brûler la fumée et n'en ont obtenu que des résultats incomplets ou nuls. D'un autre côté, plusieurs personnes ont appelé l'attention de M. le Préfet de police sur des procédés ou appareils fumivores pour lesquels elles sollicitaient son approbation. Les procédés ainsi indiqués et les applications qu'on en a faites ont été l'objet de l'examen du Conseil d'Hygiène publique et de Salubrité. Les nouvelles observations qu'il a recueillies l'ont confirmé dans l'opinion qu'il est possible de prévenir, au moyen de dispositions judicieuses et de soins convenables donnés à la conduite du foyer, l'émission de fumée par les fourneaux alimentés avec de la houille.

L'Administration n'a point à prescrire, ni à recommander de préférence certains appareils ou procédés fumivores. Elle engagerait ainsi sa responsabilité et risquerait de toucher à des intérêts privés auxquels elle doit et veut rester étrangère. D'ailleurs, les moyens de prévenir ou de brûler la fumée sont nombreux et variés; ils doivent être modifiés non-seulement dans les dimensions, mais dans les parties essentielles des appareils qu'ils comportent, suivant les fourneaux auxquels on les applique. Le but de la présente instruction est donc uniquement de donner des indications générales aux propriétaires d'appareils à vapeur, qui doivent adopter, après examen et informations, le procédé qui leur paraîtra le mieux approprié au genre de foyers qu'ils emploient, et s'adresser, pour l'exécution, à un ingénieur ou constructeur de leur choix.

L'origine de la fumée est dans les produits volatils qui se dégagent abondamment de la plupart des combustibles, tels que les diverses variétés de houille, la tourbe, le bois, lorsqu'ils sont exposés soudainement à une température élevée. Ces produits sont, en majeure partie, des carbures d'hydrogène, qui sont eux-mêmes très-combustibles. Mais, pour qu'ils s'enflamment, deux conditions sont nécessaires : 1° leur mélange avec l'air en proportion convenable; 2° une haute température de ce mélange. Si ces deux conditions ne sont pas réalisées dans le foyer lui-même, ou dans les conduits que parcourent les produits gazeux de la combustion, les carbures d'hydrogène subissent une décomposition dont le résultat est un dépôt abondant de suie ou de charbon en particules ténues qui sont entraînées dans le courant de gaz sortant par l'orifice de la cheminée. Lorsque l'on jette sur une grille, actuellement couverte de coke incandescent, une quantité de houille assez considérable pour la couvrir presque en totalité d'une couche de 20 à 25 centimètres d'épaisseur, les parties de houille fraîche qui se trouvent en contact avec le coke, subissent une distillation rapide; la température de l'intérieur du foyer baisse subitement, en même temps que le passage de l'air à travers la grille et la charge de combustible se trouve obstrué. Aucune des deux conditions nécessaires pour l'inflammation des carbures d'hydrogène n'est réalisée; aussi voit-on des torrents d'une fumée opaque sortir par la cheminée. L'introduction de l'air, dans de telles circonstances, par la porte du foyer ou par toute autre ouverture débouchant directement au-dessus du chargement de houille, reste sans effet, parce que la température est insuffisante pour l'inflammation des produits gazeux. La fumée décroît graduellement d'intensité, à mesure que la houille se convertit en coke, par le dégagement des parties volatiles; que l'air trouve un accès plus libre à travers le combustible aggloméré en morceaux laissant entre eux d'assez larges intervalles, et que la température s'élève de nouveau, par l'effet de la combustion. Si, avant que la distilla-

tion soit complète, on agite avec un ringard le mélange de houille et de coke déposé sur la grille, on amène des portions de houille non encore carbonisée au contact des fragments de coke les plus chauds, la distillation devient plus rapide et il y a une recrudescence de fumée.

Les foyers dont les grilles ont assez d'étendue pour que les charges de combustible ne les recouvrent qu'en partie et en couche de faible épaisseur, donnent peu de fumée, surtout si la houille y est chargée par petites quantités à la fois, et si le chauffeur a la précaution de déposer la charge sur la partie antérieure de la grille, de telle sorte que les produits gazeux de la distillation arrivent aux carneaux, en passant sur la surface du coke embrasé qui recouvre la partie postérieure, et laisse toujours un passage suffisant à l'entrée de l'air. La production de fumée est considérablement accrue par les dimensions trop petites des grilles, eu égard à la quantité de combustible qui doit être brûlée dans un temps donné, et par une mauvaise conduite du foyer de la part des chauffeurs qui chargent à de trop longs intervalles et par trop grandes quantités à la fois. Elle est d'autant plus abondante, toutes choses égales d'ailleurs, que l'on fait usage de combustibles contenant plus de parties volatiles, et, pour ne parler que de la houille, de variétés *plus grasses et plus collantes*. Les houilles sèches de quelques mines du département du Nord et des environs de Charleroy, en Belgique, ne donnent que peu de fumée, dans des foyers passablement construits et alimentés avec quelque soin. Le coke n'en donne point du tout; il ne s'écoule, par l'orifice de la cheminée des foyers alimentés avec ce combustible, que des gaz incolores entraînant quelques cendres ou poussières extrêmement ténues.

Il n'est pas possible de décrire, dans une instruction, les nombreux appareils et procédés qui ont été imaginés dans le but de prévenir, de brûler ou de condenser la fumée. Nous ne pouvons qu'indiquer d'une manière générale les principes sur lesquels ils reposent (1).

Tous les appareils et procédés fumivores connus ont pour but de réaliser les deux conditions que nous avons indiquées comme nécessaires pour opérer l'inflammation et la combustion complète, dans le fourneau, des carbures d'hydrogène résultant de la distillation du combustible.

Les uns comportent des appareils mécaniques, mis en jeu par la machine à vapeur employée dans l'établissement, et qui ont pour objet de distribuer le combustible sur la grille, soit d'une manière continue, soit par petites portions à la fois, à des intervalles de temps réguliers et courts. Tels sont les distributeurs mécaniques et les grilles mobiles qui sont généralement désignés par les noms de leurs inventeurs.

D'autres comportent seulement des appareils fixes ou mus à la main par le chauffeur; ils sont destinés à mesurer les charges de combustible que l'on introduit dans le foyer, sans donner accès, par l'ouverture de la porte, à un grand volume d'air qui occasionnerait un refroidissement nuisible. Ils sont, le plus souvent, combinés avec des dispositions particulières du foyer et des ouvertures ménagées dans la porte ou les parois et munies de registres qui sont ouverts, après chaque chargement, pour admettre l'air nécessaire à la combustion des produits de la distillation. Quelques-uns sont disposés de manière que le combustible frais soit amené dans le foyer en dessous du combustible déjà carbonisé, à l'inverse de ce qui a lieu dans les fourneaux ordinaires, où le combustible frais est jeté à la pelle sur le coke dont la grille est couverte. L'air arrive sur la houille, à l'endroit où elle commence à distiller, de sorte que les produits volatils combustibles s'enflamment au moment même où ils prennent naissance.

Un grand nombre d'appareils comportent deux ou plusieurs foyers qui doivent être chargés alternativement; des jeux de registres convenablement disposés et que le chauffeur manœuvre au moment opportun, forcent les produits fumeux du foyer récemment

(1) On trouvera des renseignements et des détails plus étendus sur cette matière dans divers recueils scientifiques et industriels, particulièrement dans une notice insérée au bulletin du mois de mars 1855 de la Société d'encouragement pour l'industrie nationale, et qui a été imprimée séparément par les soins de la Société.

chargé à passer dans celui qui contient du combustible déjà carbonisé, quelquefois même à traverser la grille de ce foyer et le coke embrasé qui la couvre. L'air arrivant d'ailleurs en quantité suffisante, soit entre les barreaux de cette grille, soit, au besoin, par des ouvreaux particuliers, les produits gazeux émanés du premier foyer s'enflamment et sont brûlés complétement dans le second.

D'autres procédés comportent seulement des fourneaux et des grilles de formes spéciales, par exemple, des grilles inclinées et disposées en marches d'escalier, et des ouvreaux, pourvus de registres, par lesquels l'air extérieur est admis au milieu des produits gazeux de la combustion, soit d'une manière continue, soit par intervalles.

On a essayé d'éviter la fumée au moyen d'un courant d'air forcé qu'un ventilateur lance sous la grille, ou qui est simplement déterminé par un filet de vapeur venant de la chaudière, et que l'on fait jaillir dans l'axe d'un tuyau cylindrique, ouvert à ses deux extrémités, dont une débouche dans l'atmosphère et l'autre dans le cendrier.

On a appliqué au chauffage des chaudières à vapeur et autres foyers industriels, la combustion du gaz oxyde de carbone qui se dégage abondamment par les gueulards des hauts fourneaux à fondre les minerais, alimentés au charbon de bois ou au coke. On se procure même l'oxyde de carbone mêlé à d'autres produits gazeux inflammables, en traitant, dans des appareils spéciaux, des combustibles de toute nature, et principalement ceux de qualité inférieure, tels que des poussiers de halle à charbon, des houilles terreuses, de la tourbe, etc. Ces gaz sont amenés dans les foyers où on veut les utiliser, en même temps que de l'air atmosphérique en proportion convenable. Le mélange, une fois allumé, continue à brûler sans émission de fumée.

Enfin on a, dans quelques cas, soumis les gaz fumeux, qui émanent d'un ou de plusieurs fourneaux, à une sorte de lavage qui les dépouille des particules de charbon et des poussières dont ils sont chargés. A cet effet, on les fait passer dans une galerie, sur une couche d'eau qui en occupe la partie inférieure. Un appareil approprié relève incessamment l'eau, pour la laisser retomber en pluie ou la lancer en gouttelettes au milieu du courant gazeux. On obtient ainsi un dépôt de noir de fumée que l'on retire, de temps à autre, de la galerie de condensation.

Il n'est aucun des procédés énumérés ci-dessus qui n'ait été déjà appliqué pour prévenir ou supprimer la fumée, et qui n'ait donné des résultats satisfaisants, sous ce rapport, lorsqu'il a été adapté à des foyers bien disposés, confiés à des chauffeurs attentifs et un peu intelligents. On a cité, il est vrai, un grand nombre d'insuccès, mais ils sont imputables à un défaut d'harmonie entre les appareils et les foyers auxquels on a voulu les appliquer, ou bien à la négligence des chauffeurs, des contre-maîtres et propriétaires d'usines, et, le plus souvent, à ce que l'on a voulu forcer la production de vapeur, en dépassant les limites en vue desquelles les appareils avaient été primitivement établis. L'Administration, pressée par de fréquentes et vives réclamations de mettre un terme aux inconvénients sans cesse croissants de la fumée, n'a pas dû se laisser arrêter par des faits négatifs, qui ne sauraient prévaloir contre les bons résultats obtenus ailleurs, d'une manière soutenue, au moyen d'appareils judicieusement appliqués et mis en œuvre avec les précautions convenables.

Dans le cas où, par suite des dimensions trop petites de la grille ou de toute autre circonstance, aucun moyen de prévenir l'émission de la fumée ne serait applicable; l'emploi des combustibles fumeux devrait être remplacé par l'usage exclusif du coke.

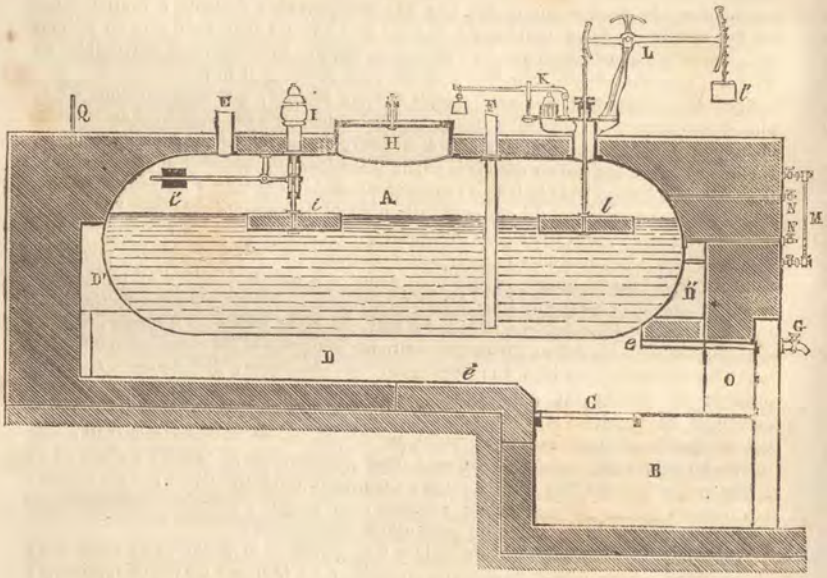
303. *Combustion des gaz sortant d'un haut fourneau.* La quantité d'air nécessaire à la combustion des gaz qui sortent d'un haut fourneau est à peu près les 4/5 de la quantité introduite dans le haut fourneau, et la pression avec laquelle il convient de l'injecter dans les gaz est de $0^m,15$ à $0^m,16$ d'eau. MM. Thomas et Laurens ont utilisé les gaz des hauts fourneaux pour le chauffage des fours à puddler. La grille se compose d'une cinquantaine de petites buses concentriques à de plus grandes;

par les premières arrive l'air amené préalablement à la température de 400° à 500°, et à la pression de $0^m,15$ à $0^m,20$ d'eau, et par les secondes arrivent les gaz amenés à la température de 200° à 300° et à la pression de $0^m,05$ à $0^m,06$ d'eau. Les buses à air n'arrivent pas jusqu'aux extrémités des buses à gaz.

### CHAUDIÈRES A VAPEUR.

**304.** La figure 63 représente, à l'échelle de 1/30, la *coupe par l'axe d'un fourneau et d'une chaudière à vapeur munie de tous les accessoires dont elle peut être garnie.*

Fig. 63.

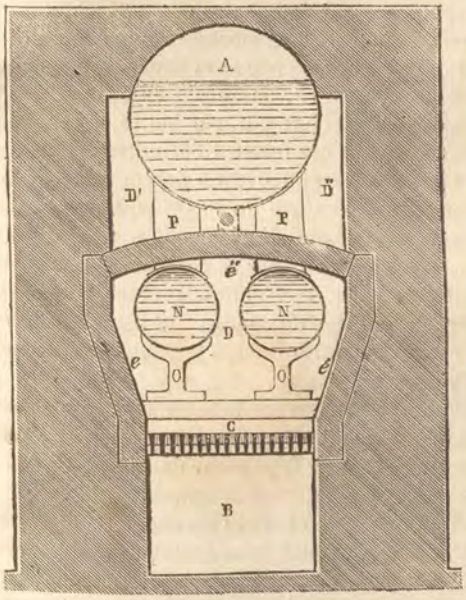



A chaudière ;
B cendrier ;
C grille ;
D, D', D'' carneaux. La fumée, en quittant la grille, suit le fond de la chaudière dans D ; elle s'élève en D', revient sur le devant du fourneau par un côté de la chaudière ; puis elle tourne en D'' pour regagner le derrière du fourneau en suivant l'autre côté de la chaudière ; enfin un canal la conduit à la cheminée ;
E tuyau de prise de vapeur ;
F tuyau d'alimentation de la chaudière ;
G robinet de vidange de la chaudière ;
H *trou d'homme*, à fermeture autoclave formée par une plaque de fonte ; il permet d'entrer dans la chaudière pour la nettoyer ;

l sifflet d'alarme;
*i* flotteur du sifflet d'alarme;
*i'* contrepoids de ce flotteur;
K soupape de sûreté chargée par l'intermédiaire d'un levier;
L indicateur à flotteur *l*, et à contrepoids *l'*, du niveau de l'eau dans la chaudière;
M tube en verre placé au devant du fourneau, et indiquant le niveau de l'eau dans la chaudière;
N, N' robinets indicateurs du niveau; l'un doit toujours donner de l'eau, et l'autre de la vapeur;
O embrasure en fonte formant l'ouverture du foyer, et sur laquelle se fixe et s'applique la porte;
Q tige servant à manœuvrer le registre qui règle le tirage, en permettant de fermer plus ou moins le canal qui conduit la fumée à la cheminée;
*e*, *e'* parties en briques réfractaires.

La figure 64 est, à l'échelle de 1/40, *la coupe perpendiculaire à l'axe d'un fourneau et d'une chaudière à bouilleurs.*

Fig. 64.




A chaudière;
B cendrier;
C grille;
D, D', D'' carneaux. La fumée va du foyer à l'autre extrémité de la chaudière par D; elle revient au-devant de la chaudière par D', et elle s'en retourne derrière par D''; pour de là aller à la cheminée;
N, N bouilleurs;
O, O *chandeliers* en fonte;
P, P cuissards; ils établissent la communication entre la chaudière et les bouilleurs;
*e*, *e'*, *e''* parties en briques réfractaires.

**305.** *Transmission de la chaleur à travers des plaques métalliques.* On admet en physique que la quantité de chaleur qui passe à travers une plaque homogène à faces parallèles, est proportionnelle à la différence des températures des deux faces de la plaque, et en raison inverse de son épaisseur. M. Péclet a cherché à vérifier cette loi par expérience; et il a reconnu que pour des plaques métalliques, chauffées d'un côté par l'eau ou par la vapeur et refroidies de l'autre par l'eau, l'influence de l'épaisseur des plaques disparaissait

quand on ne renouvelait pas convenablement l'eau en contact avec leurs faces; mais que la loi relative à l'épaisseur se vérifiait quand l'eau était vivement agitée. M. Péclet a aussi reconnu que la quantité de chaleur qui passerait en une seconde à travers une plaque de plomb de 1 mètre carré de surface et de $0^m,001$ d'épaisseur, pour une différence de température de 1° entre les deux faces, serait de 3,84 unités. Alors, en admettant les coefficients de conductibilité des métaux du n° 251, la quantité de chaleur qui passerait à travers une même plaque placée dans les mêmes circonstances, serait pour :

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| L'or. . . . . | 21.39 | La fonte. . . . . | 12.28 | Le plomb. . . . . | 3 84 |
| Le platine. . . . . | 20.99 | Le fer. . . . . | 8.01 | Le marbre. . . . . | 0.50 |
| L'argent. . . . . | 20.81 | Le zinc. . . . . | 7.77 | La porcelaine. . . | 0.26 |
| Le cuivre. . . . . | 19.16 | L'étain. . . . . | 6.50 | La terre cuite. . . | 0.24 |

D'après Clément, une plaque de cuivre de 1 mètre carré de surface et de 2 à 3 millimètres d'épaisseur, dont une face est chauffée par de la vapeur à 100°, et dont l'autre est refroidie par de l'eau à 28°, condense par heure 100 kilog. de vapeur; ce qui fait seulement 0,21 d'unité de chaleur qui passent à travers la plaque, par seconde et pour une différence de température de 1°. D'après MM. Thomas et Laurens, au moyen d'un tuyau en cuivre d'un petit diamètre, on aurait condensé 400 kil. de vapeur par mètre carré de surface de tuyau, par heure et pour une différence de température de 45°; ce qui ferait 1,36 unités de chaleur qui passeraient à travers 1 mètre carré de surface de tuyau, par seconde, pour une différence de température de 1°. On doit sans doute attribuer l'excès de ce résultat sur celui de Clément, à ce que l'air étant chassé dans le tuyau, il n'empêchait pas le contact de la vapeur avec les parois refroidissantes. D'après ces résultats et celui du tableau précédent, on voit la différence énorme de chaleur qui passe à travers une plaque de cuivre, suivant qu'on agite ou non le liquide en contact (consulter l'article *Chauffage*).

Lorsqu'on échauffe un liquide par un gaz, comme dans les chaudières à vapeur, ou un gaz par un autre, comme dans les calorifères, on peut, dans la pratique, négliger l'influence de l'épaisseur du métal.

**306.** *Métaux employés à la fabrication des chaudières à vapeur. Prix.* Ces métaux sont la fonte, la tôle et le cuivre rouge (246); mais on emploie généralement la tôle, à cause de sa grande ténacité et de son prix modéré; cependant, pour les petits appareils, il convient d'employer le cuivre, qui se courbe facilement sur un très-petit rayon.

D'après les expériences de Tredgold et celles de Clément Desormes, la fonte, la tôle rouillée et le cuivre noirci laissent passer à peu près la même quantité de chaleur dans le même temps, la fonte étant au premier rang et le cuivre au dernier; dans les chaudières à vapeur, la couche de suie tend encore à rendre égaux les effets de ces métaux.

Le prix de vente des chaudières ordinaires est, pour 100 kilog., 90 fr. pour celles en tôle; 450 fr. pour celles en cuivre, et 45 fr. pour celles en fonte.

Les vieilles chaudières se revendent, pour 100 kilog., 15 à 20 fr., suivant leur état, si elles sont en tôle; 250 fr. si elles sont en cuivre, et 12 fr. si elles sont en fonte.

La durée relative de ces diverses chaudières est une considération très-importante qui doit guider dans leur choix; mais cette durée, qui dépend des qualités de la matière dont la chaudière est fabriquée, de l'usage de la chaudière et de la manière dont le feu est conduit, est tout à fait indéterminée; tout ce que l'on peut dire, c'est que, toutes choses égales d'ailleurs, les chaudières en cuivre ont une plus grande durée que les autres. Ce sont surtout le capital premier et son intérêt qui donnent l'avantage aux chaudières en tôle et en fonte sur celles en cuivre; on rejette les chaudières en fonte à cause de leur éclat facile par un changement brusque de température.

M. Bardies aîné, associé de la maison de chaudronnerie de M^me^ Decoudun, nous communique la note suivante :

« Le prix des chaudières à vapeur varie suivant leur forme, leur timbre, qui détermine l'épaisseur, et leur force en chevaux.

» Prenant pour point de départ la forme ordinaire à deux bouilleurs, et le timbre 5, on peut compter en moyenne, pour les chaudières en tôle, 225 kilog. par force de cheval, au prix de 100 fr. les 100 kilog., et pour celles en cuivre, 250 kilog. par cheval, au prix de 460 fr. les 100 kilog.

» Les progrès de la chaudronnerie ne permettent pas d'être exclusif quant à ces données; il faut tenir compte des formes nouvelles qui viennent chaque jour apporter des économies comme poids, comme volume, comme vaporisation. Des chaudières sont tubulaires, horizontales ou verticales; d'autres sont tubulaires et à foyer intérieur, forme locomotive et locomobile. On ne peut rien préciser quant au prix de ces chaudières, d'une construction assez difficile; cependant on peut compter en moyenne sur 150 fr. les 100 kilog. pour le fer, et sur 480 fr. les 100 kilog. pour les tubes.

» Le prix de revente des vieilles chaudières est de 15 fr. les 100 kilog., vu qu'il faut tenir compte de leur démolition, les maîtres de forges n'achetant que des menues ferrailles. »

307. *Surface de chauffe des chaudières à vapeur.* D'après M. Christian, un mètre carré de surface de chaudière en fonte, entièrement plongé dans la flamme d'un feu violent, produit 100 kilog. de vapeur à l'heure. Clément a obtenu les mêmes résultats pour une chaudière en cuivre de 3 millimètres d'épaisseur placée dans les mêmes circonstances.

On n'a pas d'expériences bien concluantes sur la puissance de vapo-

risation de la surface en contact avec les carneaux. Les chaudières ordinaires les mieux établies, c'est-à-dire celles qui produisent de 6 à 6,50 kilog. de vapeur par kilogramme de houille, avec dégagement de fumée à 300°, ne produisent en une heure que de 15 à 20 kilog. de vapeur par mètre carré de surface de chauffe totale. Des constructeurs adoptent quelquefois 25 kilog.; mais il vaut mieux déterminer la surface de chauffe en ne comptant que sur une production de 20 kilog. au maximum. Les chaudières d'établissements de bains ne produisent que 12 kilog. environ de vapeur, ou mieux ne laissent passer que la quantité de chaleur équivalente à cette production, par mètre carré de surface de chauffe et par heure. Les chaudières de bateaux en produisent de 30 à 35 kilog., mais elles consomment beaucoup de combustible.

La surface de chauffe se compose de la surface totale des bouilleurs et de la partie de la surface de la chaudière comprise au-dessous du niveau supérieur des carneaux, niveau qui se trouve à $0^m,10$ ou $0^m,12$ au-dessus de l'axe de la chaudière; les parties des bouilleurs et de la chaudière en contact avec les murettes qui divisent les carneaux sont regardées comme surface de chauffe.

Dans les locomotives, on admet que chaque mètre carré de la surface de chauffe qui voit le foyer produit trois fois plus de vapeur qu'un mètre carré de surface de tuyau, et que, en considérant comme surface de chauffe (*dite surface de chauffe réduite*), la surface qui voit le foyer, augmentée du 1/3 de la surface des tubes, chaque mètre carré produit de 120 à 160 kilog. de vapeur à l'heure (Voir la 4e partie).

Connaissant la quantité de vapeur à produire, on détermine facilement, d'après ce qui précède, la surface de chauffe nécessaire, et par suite les dimensions de la chaudière.

Lorsque l'effet à produire exige deux chaudières, il convient d'en établir trois, afin que toujours une d'elles soit en réparation pendant que les deux autres fonctionnent; par là, on évite les interruptions de travail.

*TABLEAU des expériences de M. Cavé sur les chaudières avec ou sans bouilleurs.*

| SURFACE de grille en décimèt. carrés. | SURFACE de chauffe en mètres carrés. | RAPPORT de la surface de chauffe à celle de la grille. | MODE d'alimentation. | HOUILLE brûlée par heure, en kilogrammes, par décim. carré de surf. de grille. | HOUILLE brûlée par heure, en kilogrammes, par mètre carré de surf. de chauffe. | VAPEUR produite, en kilogrammes, par heure et par m. c. de surf. de chauffe. | VAPEUR produite, en kilogrammes, par kil. de houille. | NATURE DU COMBUSTIBLE. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1° Chaudière de 1 mètre de diamètre et 8 mètres de longueur, sans bouilleurs. La flamme va au fond, en contact avec la moitié du fond et de la partie latérale de la chaudière, et revient au devant en contact avec l'autre moitié, pour s'en retourner à la cheminée par un conduit isolé, au milieu duquel est le tube réchauffeur, de 0m.30 de diamètre et de 6m.25 de longueur chauffée. | | | | | | | | |
| 165 | 12.50 | 7.6 | eau froide. | 0.24 | 3.16 | 24.60 | 7.79 | Gaillette de Denain. |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.24 | *id.* | 27.65 | 8.72 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.24 | *id.* | 24.50 | 7.75 | |
| 82 | *id.* | 15.2 | *id.* | 0.48 | *id.* | 24.50 | 7.75 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.48 | *id.* | 23.80 | 7.55 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.48 | *id.* | 24.40 | 7.71 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.39 | 2.55 | 16.40 | 6.45 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.70 | 4.60 | 28.80 | 6.30 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | tube réch. | 0.48 | 3.16 | 24.70 | 7.80 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.39 | 2.55 | 18.90 | 7.42 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.48 | 3.16 | 24.00 | 7·60 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.48 | 3.15 | 21.90 | 6.90 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.53 | 3.56 | 23.30 | 6.55 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.47 | 3.10 | 21.30 | 6.90 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.46 | 3.06 | 21.30 | 6.90 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.46 | 3.06 | 20.30 | 6.62 | Toutvenant. |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.46 | 3,02 | 20.70 | 6.85 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.54 | 3.56 | 21.10 | 5.92 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.54 | 3.56 | 21.00 | 5.90 | |
| 66 | *id.* | 19.0 | *id.* | 0.60 | 3.16 | 22.80 | 7.20 | Grosse gaill. de Denain. |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.56 | 2.96 | 24.75 | 8.35 | Gaill. de Denain. |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.60 | 3.16 | 21.10 | 6.62 | Fin Denain, pas. à la claie. |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.60 | 3.16 | 24.30 | 7.70 | Gaill. impure. |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.60 | 3.16 | 20.00 | 6.32 | Gaill. passée à la claie. |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.57 | 2.98 | 25.00 | 8.32 | Gaill. de Denain. |
| 2° Même chaudière sans bouilleurs ni retour de fumée. La flamme va directement à la cheminée en léchant toute la surface de chauffe. | | | | | | | | |
| 82 | 12.50 | 15.2 | eau froide. | 0.73 | 4.80 | 27.20 | 5.68 | Presque pur St.-Étienne. |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.73 | 4.80 | 27.00 | 5.60 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.81 | 5.30 | 27.50 | 5.20 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.81 | 5.30 | 30.00 | 5.70 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.81 | 5.30 | 31.00 | 5.86 | |
| 165 | *id.* | 7.6 | *id.* | 0.44 | 5.80 | 34.80 | 6.00 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.44 | 5.80 | 35.60 | 6.17 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.44 | 5.80 | 37.00 | 6.41 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.44 | 5.80 | 37.00 | 6.41 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.44 | 5.80 | 36.90 | 6.40 | |

| SURFACE de grille en décimèt. carrés. | SURFACE de chauffe en mètres carrés. | RAPPORT de la surface de chauffe à celle de la grille. | MODE d'alimentation. | HOUILLE brûlée par heure, en kilogrammes, par décim. carré de surf. de grille | HOUILLE brûlée par heure, en kilogrammes, par mètre carré de surf. de chauffe. | VAPEUR produite, en kilogrammes, par heure et par m. c. de surf. de chauffe. | VAPEUR produite, en kilogrammes, par kil. de houille. | NATURE DU COMBUSTIBLE. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3° Chaudière de 1m.00 de diamètre et de 8m.30 de longueur, à bouilleurs de 0m.40 de diamètre. La flamme va au fond, en contact avec le fond de la chaudière et les 2/3 du contour des bouilleurs, revient au devant en contact à la fois avec le reste de la surface de chauffe, et s'en retourne par le canal du tube réchauffeur. | | | | | | | | |
| 165 | 32.18 | 19.5 | eau froide. | 0.24 | 1.20 | 8.60 | 7.12 | Gaill. de Denain. |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.24 | 1.20 | 9.10 | 7.59 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.24 | 1.20 | 9.12 | 7.60 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | tube réch. | 0.24 | 1.20 | 8.30 | 6.90 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.35 | 1.75 | 11.95 | 6.82 | |
| 4° Chaudière de 0m.80 de diamètre et de 5m.88 de longueur, à deux bouilleurs de 0m.40 de diamètre, sans retour de fumée. La flamme va directement à la cheminée en léchant à la fois tout le contour des bouilleurs et la moitié de celui de la chaudière. | | | | | | | | |
| 165 | 21.36 | 13.0 | eau froide. | 0.39 | 3.00 | 21.07 | 6.90 | Mélange de Toutvenant, Saint-Étienne et Denain. |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.39 | 3.00 | 21.07 | 6.90 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0 35 | 2.74 | 19.90 | 7.30 | |
| 82 | *id.* | 26.0 | *id.* | 0.78 | 3.00 | 17.50 | 5.82 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.75 | 2.90 | 17.50 | 6.02 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.57 | 2.18 | 13.85 | 6.35 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.57 | 2.18 | 13.40 | 6.18 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.52 | 2.01 | 11.42 | 5.70 | |
| 165 | *id.* | 13.0 | *id.* | 0.44 | 3.40 | 20.50 | 6.02 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.44 | 3.40 | 20.40 | 6.00 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.44 | 3.40 | 22.10 | 6.50 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.44 | 3.40 | 21.80 | 6.40 | |
| 5° Même chaudière à deux bouilleurs, avec retour simultané de flamme de chaque côté, et fuite à la cheminée par le canal du tube réchauffeur. | | | | | | | | |
| 165 | 21.36 | 13.0 | tube réch. | 0.44 | 3.40 | 20.90 | 6.15 | Toutvenant et Denain. |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 21.40 | 6.30 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 22.80 | 6.72 | Gaill. de Denain. |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 23.00 | 6.78 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 20.50 | 6.02 | Gaill. de Commentry. |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 20.70 | 6.10 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 21.25 | 6.27 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 21.40 | 6.30 | |
| *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 22.30 | 6.59 | |

D'après ce tableau, la quantité moyenne de vapeur produite par mètre carré de surface de chauffe totale et par heure est de 22k,25.

Ce tableau fait voir aussi que les chaudières à bouilleurs ne sont pas aussi avantageuses qu'on pouvait le supposer; c'est ce qui fait que depuis quelque temps des constructeurs suppriment les bouilleurs, et

se contentent de mettre latéralement et parallèlement à la chaudière des tubes chauffés par la fumée, et dans lesquels l'eau circule avant de pénétrer dans la chaudière.

Le faible rendement des chaudières à bouilleurs est dû à ce que la vapeur qui se forme dans les bouilleurs ne trouvant pas un écoulement assez facile par les cuissards, qui sont trop petits et en nombre insuffisant, les bouilleurs, qui devraient former la partie la plus active de la surface de chauffe, ne produisent que l'effet de tubes réchauffeurs.

Enfin, de l'examen de ce même tableau, il résulte que la quantité moyenne d'eau vaporisée par kilogramme de houille a dépassé 8 kilog. dans les deux circonstances suivantes :

1° Chaudière cylindrique sans bouilleur, à circulation dans deux galeries et un conduit allant à la cheminée ($21^m$ de circulation totale et 2 coudes), le rapport de la surface de chauffe à celle de la grille étant 7,6, la surface de chauffe $12^m,5$, et la quantité totale de houille brûlée, $39^k,5$, c'est-à-dire $0^k,24$ par décimètre carré de surface de grille.

2° La chaudière précédente avec tube réchauffeur, dans les mêmes circonstances de circulation, le rapport de la surface de chauffe à celle de la grille étant 19, et la quantité totale de houille brûlée étant $37^k,15$ en moyenne.

Des expériences de M. Cavé, il paraît résulter que le rapport de la surface de chauffe à celle de la grille étant 17, et la surface de la grille un décimètre carré par $0^k,40$ de houille à brûler, on se trouve dans les conditions les plus favorables pour obtenir 8 kil. de vapeur par kil. de charbon ; mais il convient de considérer $0^k,40$ comme étant une limite inférieure.

Dans les chaudières de M. Farcot, les bouilleurs sont remplacés par 4 tubes placés parallèlement à la chaudière et à côté de celle-ci. L'eau s'échauffe en circulant successivement dans les tubes, en sens contraire de la fumée, avant de se rendre dans la chaudière, sur laquelle se trouve l'unique prise de vapeur. Une chaudière de ce système, qui a valu à son auteur la moitié du prix de 10,000 francs proposé par la Société d'Encouragement, a produit les résultats suivants :

| | |
|---|---|
| Durée de l'expérience. . . . . | $9^h,55^m$ |
| Puissance au frein. . . . . | $30^{ch},75$ |
| Diamètre du corps de la chaudière. . . . . | $1^m,00$ |
| *Id.* de chacun des 4 bouilleurs. . . . . | $0^m,40$ |
| Longueur de la chaudière et des bouilleurs. . . . . | $6^m,00$ |
| Surface de chauffe totale. . . . . | $39^m,00$ |
| *Id.* de grille. . . . . | $0^m,84$ |
| Houille anglaise de roche brûlée, par force de cheval et par heure. . . . . | $1^k,32$ |
| Eau totale dépensée par kilogramme de houille. . . . . | $7^k,425$ |
| *Id.* par cheval et par heure. . . . . | $9^k,803$ |

**308.** *Vapeur produite par 1 kilog. de combustible.* La puissance calorifique de la houille étant 7500, et la vaporisation de 1 kil. d'eau à 0° absorbant 650 unités de chaleur (269), 1 kil. de houille devrait produire 11,54 kil. de vapeur, mais, dans la pratique, le charbon qui échappe à la combustion en tombant de la grille, le rayonnement perdu du foyer, le refroidissement des différentes parties du fourneau, et la chaleur que la fumée emporte dans la cheminée font qu'on est loin d'atteindre cette limite. Pour les chaudières ordinaires les mieux établies, 1 kil. de houille ne produit que de 6 à 6.50 kil. de vapeur; pour le plus grand nombre, il n'en produit que 5 kil., et pour les chaudières de bateaux, dont la surface de chauffe est petite (307), il n'en produit que de 3 à 4 kil. MM. Grouvelle et Jaunez, dans leur *Guide du chauffeur*, donnent les résultats du tableau suivant :

| DÉSIGNATION DES COMBUSTIBLES. | VAPEUR produite par 1 kil. de combustible. | PUISSANCES calorifiques relatives. | PRESSION DE LA VAPEUR. |
|---|---|---|---|
| | k. | | |
| Houille grasse de Mons. . . . . | 5.00 | 0.86 | 4 à 5 atmosphères. |
| *Id.* . . . . . | 6.25 | 1.00 | 1 atmosphère. |
| *Id.* . . . . . | 7.00 | 1.12 | Évaporation à basse temp. |
| Houille très-cassante, en petits morceaux. . . . . | 4.50 | 0.72 | Haute pression. |
| *Id.* . . . . . | 5.00 | 0.80 | Basse pression. |
| Coke fabriqué au four (1re qualité). | 4.65 | 0.74 | Haute press. (chaud. ord.). |
| *Id.* . . . . . | 5.80 | 0.92 | Locomotives. |
| Bois de sapin et hêtre, de 13 mois. | 2.70 | 0.43 | Basse pression. |
| Bois de chêne. . . . . | 2.50 | 0.40 | *Id.* |
| Charbon de bois. . . . . | 6.00 | 0.96 | *Id.* |
| Lignite. . . . . | 3.50 | 0.56 | *Id.* |
| Tourbe (1re qualité). . . . . | 2.70 | 0.43 | *Id.* |
| *Id.* compacte comprimée. . . | 4.00 | 0.64 | *Id.* |
| Tannée sechée. . . . . | 2.00 | 0.32 | *Id.* |

**309.** *Chaudières à vapeur placées sur des fours à puddler, à réchauffer et à affiner.* Un four à puddler consomme moyennement 85 kil. de houille à l'heure, et un four à réchauffer de 100 à 110 kilog. La section de la cheminée de ces fours est ordinairement d'un décimètre carré pour une consommation de $4^k$ à $4^k,5$ de houille à l'heure (295), et la section de la grille, de 4 décimètres carrés pour la même consommation (301).

Quand un four à puddler ou à réchauffer est muni d'une chaudière à vapeur, il faut, d'après M. Grouvelle, que la section de la cheminée et des carneaux soit d'un décimètre carré pour une consommation de 3 kil. à $3^k,30$ de houille à l'heure. Des expériences faites par M. Lucas Championnière tendent à prouver qu'il y aurait utilité à augmenter un

peu cette section : ainsi elles ont fait voir qu'au-dessus de 3 kil. par décimètre carré, le tirage et le travail souffraient toujours ; aussi a-t-on porté la section à un décimètre carré pour $2^k.7$ de houille.

La hauteur de la cheminée varie de 12 à 13 mètres.

Pour les fours à réchauffer, il convient également d'adopter les proportions précédentes, en ayant égard à la plus grande consommation de charbon.

La surface de chauffe peut être la même que si le charbon était brûlé directement sous la chaudière. Il résulte aussi, d'après M. Grouvelle, que la production des chaudières placées à la suite des fours à réchauffer est de 4 à 5 kilog. de vapeur à 5 atmosphères, par kilog. de houille brûlée, et que celle des chaudières placées à la suite des fours à puddler est de $3^k$ à $3^k,5$ seulement; mais, d'après d'autres renseignements, dit M. Péclet, il paraîtrait que ces dernières produisent de 4 à 5 kilog. de vapeur par kilogramme de houille, et que chaque mètre carré de surface de chauffe fournit de 16 à 18 kilog. de vapeur à l'heure.

On peut compter, ajoute M. Grouvelle, que la puissance d'une chaudière placée à la suite d'un four à puddler est de 16 à 18 chevaux, et que pour un générateur placé à la suite d'un four à réchauffer elle est de 25 à 30 chevaux. Cet auteur admet de plus que deux fours à réchauffer, travaillant en échantillons différents, donnent de la vapeur en quantité largement suffisante pour leur travail au laminoir, et que le four à puddler suffit également au travail du cinglage au marteau et au laminoir.

D'après MM. Thomas et Laurens, sur un feu d'affinerie marchant au charbon de bois, et produisant de 22 à 24 tonnes de fer par mois, on peut placer une chaudière à vapeur ayant 16 mètres carrés de surface de chauffe, et produire de 150 à 180 kilog. de vapeur à l'heure, même en plaçant entre le four à affiner et la chaudière un petit four destiné à commencer le chauffage de la fonte à affiner, ou à chauffer le fer à étirer.

**310.** *Chaudières chauffées par les gaz des hauts-fourneaux.* L'expérience prouve qu'en utilisant convenablement la chaleur perdue dans un haut-fourneau au bois, elle est plus que suffisante pour chauffer l'air d'injection à 300° et produire la vapeur nécessaire pour faire fonctionner la machine soufflante.

La composition des gaz sortant d'un haut-fourneau au charbon de bois est, d'après M. Bunten, de 2,32 d'hydrogène, 0,66 d'hydrogène protocarboné, 32,59 d'oxyde de carbone, 3,49 d'acide carbonique et 60,94 d'azote. En supposant que les gaz combustibles ne soient composés que d'oxyde de carbone, leur combustion complète développerait une quantité de chaleur égale aux 0.80 de celle qui correspond au combustible introduit dans le haut-fourneau.

D'après MM. Thomas et Laurens, une machine à vapeur à détente et condensation, de la force de 18 chevaux, dont la chaudière était chauffée par les gaz d'un haut-fourneau au bois, a donné de bons résultats, la section de la cheminée et des carneaux étant de 28 décimètres carrés, la hauteur de la cheminée 8 mètres, et la surface de chauffe calculée sur une production de 15 à 17 kilog. de vapeur à l'heure par mètre carré.

La combustion des gaz sortant d'un haut-fourneau au coke peut facilement produire la vapeur nécessaire à la machine soufflante (214).

**311.** *Épaisseur théorique des chaudières à vapeur.* L'effort qui tend à rompre une chaudière à vapeur suivant une génératrice, par millimètre de longueur, est exprimé par $\frac{pD}{2}$, et on a

$$\frac{pD}{2} = ef, \quad \text{d'où} \quad e = \frac{pD}{2f}.$$

$p$ pression de la vapeur en kilog., sur un millimètre carré de surface de chaudière ($p$ est la différence des pressions à l'intérieur et à l'extérieur de la chaudière);
D diamètre de la chaudière en millimètres;
$e$ épaisseur de la chaudière en millimètres;
$f$ résistance à la traction du métal qui compose la chaudière, par millimètre carré de section (page 256).

Cette formule est la même que celle posée au n° 177 pour les tuyaux de conduite des eaux; seulement la hauteur $h$ en mètres d'eau est exprimée en kilogrammes sur un millimètre carré de surface, ce qui donne $p = \frac{h \times 10}{10\,000} = \frac{h}{1000}$; le diamètre de la chaudière D est exprimé en millimètres au lieu de l'être en mètres, ce qui donne $D = d \times 1000$, et R est représenté par $f$.

L'effort qui tend à rompre une chaudière suivant un grand cercle des demi-sphères qui la terminent est $\frac{pD}{4}$, et on a

$$\frac{pD}{4} = ef, \quad \text{d'où} \quad e = \frac{pD}{4f}.$$

**312.** *Ordonnances des 22 et 23 mai 1843 relatives aux appareils à vapeur.* Ces ordonnances sont relatives à la *fabrication des chaudières à vapeur et à leur établissement*, c'est-à-dire à leur autorisation, aux épreuves qu'elles doivent subir, à leur épaisseur, à leurs appareils de sûreté (soupapes, manomètres, appareils d'alimentation, indicateurs de niveau), à leur emplacement, et à la surveillance administrative des machines à vapeur. Ces ordonnances comprennent en outre les dispositions relatives à l'établissement des machines employées dans l'intérieur des mines, et celles relatives à l'emploi des machines à vapeur locomobiles et locomotives (quatrième partie).

Ce qui va suivre sur les chaudières à vapeur est extrait en grande partie de ces ordonnances.

315. *Épaisseur pratique à donner aux chaudières à vapeur en tôle et en cuivre.* Cette épaisseur se détermine à l'aide de la formule

$$e = 1{,}8d(n-1)+3, \quad \text{d'où} \quad n = 1 + \frac{e-3}{1{,}8d}.$$

$e$ épaisseur de la chaudière en millimètres ;
$d$ diamètre de la chaudière en mètres ;
$n$ tension absolue de la vapeur dans la chaudière, ou n° du timbre ; la pression effective en atmosphères est $n-1$.

De la formule précédente on conclut les épaisseurs $e$ à donner aux chaudières cylindriques en tôle ou en cuivre laminé, consignées dans le tableau suivant.

| DIAMÈTRES des chaudières. | NUMÉROS DES TIMBRES exprimant les tensions absolues de la vapeur dans la chaudière. | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2 atmosph. | 3 atmosph. | 4 atmosph. | 5 atmosph. | 6 atmosph. | 7 atmosph. | 8 atmosph. |
| mèt. | millim. | millim. | millim. | millim. | millim. | millim. | millim. |
| 0.50 | 3.90 | 4.80 | 5.70 | 6.60 | 7.50 | 8.40 | 9.30 |
| 0.55 | 3.99 | 4.98 | 5.97 | 6.96 | 7.95 | 8.94 | 9.93 |
| 0.60 | 4.08 | 5.16 | 6.24 | 7.32 | 8.40 | 9.48 | 10.56 |
| 0.65 | 4.17 | 5.34 | 6.51 | 7.68 | 8.85 | 10.02 | 11.19 |
| 0.70 | 4.26 | 5.52 | 6.78 | 8.04 | 9.30 | 10.56 | 11.82 |
| 0.75 | 4.35 | 5.70 | 7.05 | 8.40 | 9.75 | 11.10 | 12.45 |
| 0.80 | 4.44 | 5.88 | 7.32 | 8.76 | 10.20 | 11.64 | 13.08 |
| 0.85 | 4.53 | 6.06 | 7.59 | 9.12 | 10.65 | 12.18 | 13.71 |
| 0.90 | 4.62 | 6.24 | 7.86 | 9.48 | 11.10 | 12.72 | 14.34 |
| 0.95 | 4.71 | 6.42 | 8.13 | 9.84 | 11.55 | 13.26 | 14.97 |
| 1.00 | 4.80 | 6.60 | 8.40 | 10.20 | 12.00 | 13.80 | 15.60 |

L'épaisseur de la tôle ou du cuivre laminé ne doit d'ailleurs jamais dépasser 15 millimètres ; si, en raison du diamètre projeté de la chaudière et de la tension de la vapeur, une épaisseur plus forte était nécessaire, le fabricant devrait substituer à une chaudière unique plusieurs chaudières séparées, de diamètres plus petits.

Lorsqu'une partie de la chaudière sera plane, l'épaisseur de cette partie devra être augmentée.

L'ordonnance n'assigne pas de règle pour l'épaisseur des chaudières en fonte ; mais, d'après l'instruction annexée aux ordonnances (312), on doit considérer comme suspecte, toute chaudière en fonte de forme cylindrique dont l'épaisseur ne serait pas égale à 5 fois l'épaisseur prescrite pour la même chaudière en tôle ou en cuivre laminé.

Comme dans le commerce on ne trouve pas des tôles de toutes les

épaisseurs, les constructeurs de chaudières ne font usage que de tôles d'un certain nombre d'épaisseurs, mais toujours supérieures à celles que prescrivent les ordonnances. M. Péclet rapporte, dans son *Traité de la chaleur*, les proportions de chaudières du tableau suivant, usitées dans un des principaux établissements de chaudronnerie de Paris, pour une pression de 5 atmosphères.

| NOMBRE de chevaux. | LONGUEUR de la chaudière. | LONGUEUR de chacun des deux bouilleurs. | DIAMÈTRE de la chaudière. | DIAMÈTRE des bouilleurs. | ÉPAISSEUR de la tête de la chaudière. | ÉPAISSEUR de la tête des bouilleurs. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | m. | m. | m. | m. | millimèt. | millimèt. |
| 2 | 1.65 | 1.75 | 0.66 | 0.28 | 8 | 8 |
| 4 | 2.10 | 2.20 | 0.70 | 0.30 | 8 | 8 |
| 6 | 2.45 | 2.60 | 0.75 | 0.35 | 9 | 10 |
| 8 | 2.80 | 2.95 | 0.80 | 0.35 | 10 | 10 |
| 10 | 3.25 | 3.40 | 0.80 | 0.35 | 10 | 10 |
| 15 | 5.00 | 5.15 | 0.80 | 0.44 | 10 | 10 |
| 20 | 6.80 | 7.00 | 0.85 | 0.50 | 10 | 10 |
| 25 | 8.50 | 8.65 | 0.85 | 0.50 | 10 | 10 |
| 30 | 9.20 | 9.50 | 1.00 | 0.60 | 10.5 | 10 |
| 40 | 10.00 | 10.38 | 1.10 | 0.60 | 11 | 10 |

Sauf les deux premières chaudières de ce tableau, qui ont des surfaces de chauffe trop grandes, les autres ont des surfaces de chauffe de $1^{mc},70$ environ par force de cheval. Supposant que la consommation est de 5 kilog. de houille par force de cheval et par heure, et que chaque kilog. de houille produit 5 kilog. de vapeur, il en résulte que chaque mètre carré de surface de chauffe ne donne que 15 kilog. de vapeur à l'heure (307).

Une circulaire ministérielle adressée aux préfets, en date du 22 mars 1853, prohibe à l'avenir l'usage des calottes en fonte pour former l'extrémité des bouilleurs qui est en contact avec la flamme ou les gaz provenant de la combustion. L'emploi de la fonte ne peut être permis que pour la fermeture autoclave de l'extrémité extérieure et apparente des bouilleurs et pour les tubulures qui réunissent les bouilleurs au corps des chaudières.

**314.** *Épreuves des chaudières à vapeur.* Aucune chaudière à vapeur ne peut être mise en activité dans un établissement quelconque, sans avoir été préalablement essayée, à l'aide d'une pompe foulante à eau, à une pression triple de la pression effective $n-1$ (n° 313), pour les chaudières, tubes bouilleurs et réservoirs en tôle ou en cuivre laminé, et quintuple pour les chaudières ou tubes bouilleurs en fonte.

Les cylindres en fonte des machines à vapeur et les enveloppes en fonte de ces cylindres sont éprouvés à une pression triple de la pression effective.

Aucune machine ou chaudière à vapeur ne peut être livrée par un fabricant, si elle n'a été soumise aux épreuves précédentes; ces épreuves sont faites à la fabrique, sur la déclaration des fabricants et d'après les ordres des préfets, par les ingénieurs des mines, ou, à leur défaut, par les ingénieurs des ponts et chaussées. L'épreuve est recommencée sur l'établissement dans lequel les machines ou chaudières doivent être employées : 1° si le propriétaire la réclame; 2° s'il y a eu, pendant le transport ou lors de la mise en place, des avaries notables; 3° si des modifications ou opérations quelconques ont été faites depuis l'épreuve opérée à la fabrique.

Les chaudières ou machines à vapeur venant de l'étranger doivent être pourvues des mêmes appareils de sûreté que les machines ou chaudières d'origine française, et subir les mêmes épreuves. Ces épreuves sont faites au lieu désigné par le destinataire, dans la déclaration qu'il doit faire à l'importation.

Une circulaire aux préfets, en date du 6 janvier 1852, porte ce qui suit :

« Il peut y avoir des cas où l'épreuve faite seulement à la pression double soit suffisante : par exemple pour les chaudières à double fond, dans lesquelles l'espace occupé par la vapeur est très-petit, et lorsque, d'ailleurs, ces chaudières sont bien établies et qu'il est reconnu qu'eu égard à leur disposition, une déchirure du métal, si elle avait lieu, n'aurait que des conséquences peu graves.

» Mais cette épreuve à la pression double ne doit être qu'une exception. En thèse générale, tout récipient où la vapeur ne s'échappe pas librement dans l'atmosphère doit être éprouvé à la pression triple : tels sont les cylindres sécheurs, les retours d'eau et une foule d'autres récipients où la vapeur n'est pas à échappement parfaitement libre. »

315. *Autorisation pour l'établissement des machines à vapeur et des chaudières à vapeur.* Les machines à vapeur et les chaudières à vapeur, tant à haute qu'à basse pression, qui sont employées à demeure partout ailleurs que dans les mines, ne peuvent être établies qu'en vertu d'une autorisation délivrée par le préfet du département, conformément à ce qui est prescrit par le décret du 15 octobre 1810 pour les établissements insalubres et incommodes de 2e classe. (*Voir* ce décret à la fin de la 2e partie.)

La demande en autorisation est adressée au préfet. Elle fait connaître :

1° La pression maximum de la vapeur, exprimée en atmosphères et en fractions décimales d'atmosphère, sous laquelle les machines à vapeur ou les chaudières à vapeur doivent fonctionner;

2° La force de ces machines, exprimée en chevaux (36);

3° La forme des chaudières, leur capacité et celle de leurs tubes bouilleurs, exprimées en mètres cubes;

4° Le lieu et l'emplacement où elles doivent être établies, et la dis-

tance où elles se trouveront des bâtiments appartenant à des tiers et de la voie publique;

5° La nature du combustible que l'on emploiera :

6° Enfin le genre d'industrie auquel les machines ou les chaudières devront servir.

Un plan des localités et le dessin géométrique de la chaudière sont joints à la demande.

Le préfet renvoie immédiatement la demande en autorisation, avec les plans, au sous-préfet de l'arrondissement, pour être transmise au maire de la commune, qui procède immédiatement à des informations de *commodo* et *incommodo;* la durée de cette enquête est de dix jours; cinq jours après qu'elle est terminée, le maire adresse le procès-verbal de l'enquête, avec son avis, au sous-préfet, lequel, dans un semblable délai, transmet le tout au préfet, en y joignant également son avis. Dans le délai de quinze jours, le préfet, après avoir pris l'avis de l'ingénieur des mines, ou, à son défaut, de l'ingénieur des ponts et chaussées, statue sur la demande en autorisation.

Le recours au conseil d'État est ouvert au demandeur contre la décision du préfet qui aurait refusé d'autoriser l'établissement d'une machine ou chaudière à vapeur.

**316.** *Soupapes de sûreté.* Il est adapté à la partie supérieure de chaque chaudière deux soupapes de sûreté, une vers chaque extrémité de la chaudière (304). Chaque soupape est chargée d'un poids unique agissant, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un levier. Chaque poids reçoit l'empreinte d'un poinçon. Dans le cas où il est fait usage de leviers, ils doivent également être poinçonnés. La quotité des poids et la longueur des leviers sont fixés par l'arrêté d'autorisation du préfet.

La charge maximum de chaque soupape de sûreté est déterminée en multipliant $1^k,033$ par le nombre d'atmosphères mesurant la pression effective (313), et par le nombre de centimètres carrés mesurant l'orifice de la soupape.

La largeur de la surface annulaire de recouvrement ne doit pas dépasser la trentième partie du diamètre de la surface circulaire exposée directement à la pression de la vapeur, et cette largeur, dans aucun cas, ne doit excéder deux millimètres.

Le diamètre de la partie exposée directement à la vapeur étant, en millimètres,

20 25 30 35 40 45 50 55 60 et au-dessus,

la largeur maximum en millimètres de la surface annulaire de contact est respectivement

0,67 0,83 1,00 1,17 1,32 1,50 1,67 1,83 2,00.

Le diamètre des soupapes de sûreté est donné par la formule

$$d = 2{,}6\sqrt{\frac{s}{n - 0{,}412}}. \qquad (a)$$

$d$ diamètre de la soupape en centimètres;

$s$ surface de chauffe de la chaudière, y compris les parties de parois situées dans les carneaux ou conduits de la flamme et de la fumée, exprimée en mètres carrés;

$n$ numéro du timbre (313).

*De la formule précédente on conclut, pour les diamètres des soupapes,* les résultats du tableau suivant :

| SURF. DE CHAUFFE des chaudières. | NUMÉROS DES TIMBRES indiquant les tensions absolues de la vapeur dans les chaudières. | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 1/2 atmos. | 2 atmos. | 2 1/2 atmos. | 3 atmos. | 3 1/2 atmos. | 4 atmos. | 4 1/2 atmos. | 5 atmos. | 5 1/2 atmos. | 6 atmos. |
| m. car. | cent. | cent. | cent. | cent. | cent. | cent. | cent. | cent. | cent. | cent. |
| 1 | 2.493 | 2.063 | 1.799 | 1.616 | 1.479 | 1.372 | 1.286 | 1.214 | 1.152 | 1.100 |
| 2 | 3.525 | 2.918 | 2.544 | 2.286 | 2.092 | 1.941 | 1.818 | 1.716 | 1.630 | 1.555 |
| 3 | 4.317 | 3.573 | 3.116 | 2.799 | 2.563 | 2.377 | 2.227 | 2.102 | 1.996 | 1.905 |
| 4 | 4.985 | 4.126 | 3.598 | 3.232 | 2.959 | 2.745 | 2.572 | 2.427 | 2.305 | 2.200 |
| 5 | 5.574 | 4.613 | 4.023 | 3.614 | 3.308 | 3.069 | 2.875 | 2.714 | 2.578 | 2.459 |
| 6 | 6.106 | 5.054 | 4.407 | 3.958 | 3.624 | 3.362 | 3.149 | 2.973 | 2.823 | 2.694 |
| 7 | 6.595 | 5.458 | 4.760 | 4.276 | 3.914 | 3.631 | 3.402 | 3.211 | 3.045 | 2.910 |
| 8 | 7.050 | 5.835 | 5.089 | 4.571 | 4.185 | 3.882 | 3.637 | 3.433 | 3.260 | 3.111 |
| 9 | 7.478 | 6.189 | 5.398 | 4.848 | 4.438 | 4.117 | 3.857 | 3.641 | 3.458 | 3.299 |
| 10 | 7.882 | 6.524 | 5.690 | 5.110 | 4.679 | 4.340 | 4.066 | 3.838 | 3.645 | 3.478 |
| 11 | 8.267 | 6.843 | 5.967 | 5.360 | 4.907 | 4.552 | 4.265 | 4.025 | 3.823 | 3.648 |
| 12 | 8.635 | 7.147 | 6.233 | 5.598 | 5.125 | 4.754 | 4.454 | 4.204 | 3.993 | 3.810 |
| 13 | 8.987 | 7.439 | 6.487 | 5.827 | 5.334 | 4.949 | 4.636 | 4.376 | 4.156 | 3.965 |
| 14 | 9.325 | 7.720 | 6.732 | 6.047 | 5.536 | 5.138 | 4.811 | 4.541 | 4.312 | 4.124 |
| 15 | 9.654 | 7.990 | 6.968 | 6.259 | 5.730 | 5.316 | 4.980 | 4.701 | 4.464 | 4.259 |
| 16 | 9.970 | 8.253 | 7.197 | 6.464 | 5.918 | 5.490 | 5.143 | 4.854 | 4.610 | 4.399 |
| 17 | 10.277 | 8.506 | 7.418 | 6.663 | 6.100 | 5.659 | 5.302 | 5.004 | 4.752 | 4.534 |
| 18 | 10.575 | 8.753 | 7.633 | 6.841 | 6.277 | 5.823 | 5.455 | 5.149 | 4.890 | 4.666 |
| 19 | 10.865 | 8.993 | 7.842 | 7.044 | 6.449 | 5.982 | 5.605 | 5.290 | 5.024 | 4.794 |
| 20 | 11.147 | 9.227 | 8.046 | 7.227 | 5.616 | 6.138 | 5.750 | 5.428 | 5.154 | 4.918 |
| 21 | 11.423 | 9.454 | 8.245 | 7.380 | 6.780 | 6.289 | 5.892 | 5.561 | 5.282 | 5.040 |
| 22 | 11.691 | 9.677 | 8.439 | 7.580 | 6.939 | 6.437 | 6.031 | 5.692 | 5.406 | 5.158 |
| 23 | 11.954 | 9.894 | 8.629 | 7.750 | 7.095 | 6.582 | 6.167 | 5.820 | 5.527 | 5.274 |
| 24 | 12.211 | 10.107 | 8.814 | 7.917 | 7.248 | 6.723 | 6.299 | 5.845 | 5.646 | 5.388 |
| 25 | 12.463 | 10.316 | 8.996 | 8.080 | 7.397 | 6.862 | 6.429 | 6.069 | 5.763 | 5.499 |
| 26 | 12.710 | 10.520 | 9.174 | 8.240 | 7.544 | 6.998 | 6.556 | 6.188 | 5.877 | 5.608 |
| 27 | 12.952 | 10.720 | 9.349 | 8.397 | 7 776 | 7.132 | 6.681 | 6.306 | 5.989 | 5.715 |
| 28 | 13.190 | 10.917 | 9.520 | 8.551 | 7.828 | 7.262 | 6.804 | 6.422 | 6.099 | 5.819 |
| 29 | 13.423 | 11.110 | 9.689 | 8.703 | 7.967 | 7.391 | 6.924 | 6.535 | 6.207 | 5.922 |
| 30 | 13.653 | 11.300 | 9.855 | 8.851 | 8.103 | 7.517 | 7.043 | 6.648 | 6.313 | 6.024 |

L'expérience a fait voir qu'une seule soupape, dont l'orifice avait un diamètre déterminé par la formule empyrique précédente, suffisait

pour débiter toute la vapeur qui pourrait se former dans la chaudière, à la tension de $n$ atmosphères, sous l'influence du feu le plus actif. Ainsi, quand une chaudière sera munie de deux soupapes ayant les dimensions prescrites et fonctionnant bien, on n'aura point à craindre que la tension de la vapeur dépasse la limite assignée, sauf peut-être le cas où l'eau, par suite d'un défaut d'alimentation, parviendrait à atteindre des parois rouges.

« Une circulaire du ministre aux préfets, en date du 5 mars 1852, prescrit de placer les soupapes des cylindres sécheurs, non pas sur les tuyaux d'amenée de la vapeur, mais bien sur des renflements ou réservoirs intermédiaires pratiqués à cet effet près des embranchements qui conduisent la vapeur aux cylindres, et ayant une capacité de 25 litres au moins. Le diamètre des soupapes des cylindres sécheurs se calcule à l'aide de la formule précédente ($a$), dans laquelle $s$ représente la surface de chauffe du générateur, $n$ la pression absolue en atmosphères, que la vapeur ne doit pas dépasser dans les cylindres, et $d$ le diamètre de la soupape en centimètres.

» Il est cependant de certains cas où l'on peut s'écarter de cette règle, celui, par exemple, où il est bien démontré, d'après la disposition de l'ensemble de l'appareil, que la vapeur débitée par la chaudière ne pourra se rendre qu'en partie dans les cylindres sécheurs. »

Les nouvelles ordonnances (312) dispensent de munir les chaudières à vapeur de plaques fusibles, ce qui était exigé avant leur promulgation.

**317.** *Manomètres.* Toute chaudière à vapeur doit être munie d'un manomètre à mercure, gradué en atmosphères et en fractions décimales d'atmosphères, de manière à faire connaître immédiatement la tension de la vapeur dans la chaudière. Le tuyau qui amène la vapeur au manomètre est adapté directement sur la chaudière, et non sur le tuyau de prise de vapeur ou sur tout autre tuyau dans lequel la vapeur est en mouvement.

Le manomètre doit être placé en vue du chauffeur.

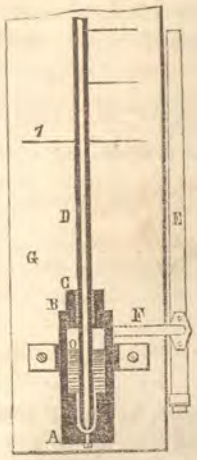
Le manomètre doit être à air libre, c'est-à-dire ouvert par le haut, toutes les fois que la pression effective (313) ne dépasse pas 4 atmosphères.

Pour les chaudières de la 4e catégorie (319), le manomètre est toujours à air libre.

Une ligne, tracée d'une manière apparente sur l'échelle de chaque manomètre, indique le niveau que le mercure ne doit pas dépasser.

La fig. 65 est la coupe, à l'échelle de 1/5, d'un manomètre à air libre, à cuvette et à tube en verre.

Fig. 65.




A cuvette en fer forgé; elle est formée d'un prisme en fer à base carrée de 0m,06 de côté, ayant 0m,17 de hauteur. On a foré, suivant l'axe du prisme, une cavité cylindrique de 0m,04 de diamètre et de 0m,106 de profondeur; au fond de cette cavité s'en trouve une autre d'un diamètre moindre, dans laquelle pénètre l'extrémité du tube manométrique.

B plaque en fer carrée fermant la cuvette, sur le haut de laquelle elle est fixée par quatre vis; le joint est fait à l'aide d'un peu de mastic de minium interposé entre les surfaces de contact.

C bouchon en fer vissé dans la plaque B. Ce bouchon est percé d'un trou dont le diamètre est un peu supérieur à celui du tube en verre qu'il doit recevoir. Vers le bas ce trou est rétréci pour retenir le mastic qui doit sceller le tube dans le bouchon C.

D tube en cristal, de 0m,003 de diamètre intérieur et de 0m,009 à 0m,01 de diamètre extérieur, dont la longueur dépend du maximum de pression que le manomètre doit mesurer.

E tube en fer creux de 0m,015 de diamètre intérieur, fermé supérieurement et inférieurement par des bouchons à vis en fer.

F petit tuyau courbé établissant la communication entre le bas du tube E et la cuvette A, immédiatement au-dessous du bouchon C. Un tuyau analogue, mais suffisamment long, établit de même la communication entre le haut du tube E et la chaudière.

G madrier en sapin portant l'échelle, et auquel est fixé tout l'appareil.

Cet appareil doit être rempli de mercure et monté sur place. Le madrier étant fixé à un mur vertical, avant de mettre le tube D en place, on verse le mercure dans la cuvette, jusqu'à ce qu'il ait atteint un niveau O, tel que quand la pression sera maximum, la surface du mercure couvre encore d'un demi-centimètre au moins le haut de la partie rétrécie de la cavité de la cuvette. On met alors en place le tube D, en tenant son extrémité à 4 ou 5 millim. du fond de la cavité de la cuvette, et on le fixe au madrier G par des brides légères, en ayant soin d'interposer un peu de coton entre le tube et le madrier. On lute ensuite le tube au bouchon C, en ayant soin, pendant cette opération, d'échauffer ce dernier en le tenant entre des tenailles de forge portées au rouge sombre.

L'opération terminée et l'appareil refroidi, on remplit complétement le tube E d'eau, qui s'introduit également dans toute la partie restée vide de la cuvette, et on visse le bouchon qui ferme le haut du tube E.

La pression de la colonne d'eau a fait monter le mercure dans le tube en cristal jusqu'à un certain niveau, qui est le point de départ de l'échelle, et où l'on marque une atmosphère. A partir de ce point, on divise le madrier sur sa hauteur, en parties égales, dont chacune représente 1/10 d'atmosphère.

Désignant par $h$ l'intervalle de deux divisions, en négligeant la variation du niveau O dans la cuvette, on aurait

$$h = 0^m,076.$$

Mais pendant que le niveau du mercure s'élève de $h$ dans le tube D, il s'abaisse de $h \frac{\frac{1}{4}\pi d^2}{\frac{1}{4}\pi(\delta^2 - d'^2)}$ dans la cuvette; on a donc, en négligeant l'influence de l'eau qui remplace le mercure dans la cuvette,

$$0^m,076 = h + h\frac{d^2}{\delta^2 - d'^2}, \quad \text{d'où} \quad h = 0^m,076\,\frac{\delta^2 - d'^2}{\delta^2 - d'^2 + d^2}.$$

$d$ diamètre intérieur du tube en cristal D;
$d'$ diamètre extérieur *id.*
$\delta$ diamètre de la cavité de la cuvette A.

Comme, par suite de la condensation de la vapeur, le tube E reste constamment plein, et que l'eau qui remplace le mercure dans la cuvette tend à augmenter $h$, on a donc en réalité

$$0^m,076 = h + h\frac{d^2}{\delta^2 - d'^2} - h\frac{d^2}{\delta^2 - d'^2} \times \frac{1}{13,596},$$

ou sensiblement

$$0^m,076 = h\,\frac{27(\delta^2 - d'^2) + 25d^2}{27(\delta^2 - d'^2)}, \quad \text{d'où} \quad h = 0^m,076\,\frac{27(\delta^2 - d'^2)}{27(\delta^2 - d'^2) + 25d^2}. \quad (a)$$

13,596 densité du mercure; dans la formule on a fait $13,596 \times 2 = 27$.

Pour $\delta = 0^m,04$, $d' = 0^m,01$ et $d = 0^m,003$, on a

$$h = 0^m,076\,\frac{27(0,04^2 - 0,01^2)}{27(0,04^2 - 0,01^2) + 25 \times 0,003^2} = 0^m,0756.$$

Si le manomètre est composé de deux branches dans lesquelles il y a du mercure, sans cuvette, l'échelle se gradue encore à l'aide de la formule $(a)$, dans laquelle $\delta$ représente le diamètre intérieur de la branche qui communique avec la chaudière, et où $d' = 0$, puisque le tube en verre ne plonge plus dans la capacité de diamètre $\delta$.

Comme il est très-difficile d'obtenir des tubes très-réguliers sur une longueur aussi grande que l'exige un manomètre à air libre indiquant 5 à 6 atmosphères de pression, il convient, surtout pour les manomètres sans cuvette, de les graduer au moyen d'une pompe portant un manomètre étalon.

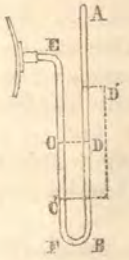
Lorsque le tube indicateur est en verre, on voit le niveau du mercure dans toutes ses positions; mais quand il est en fer, on est obligé d'indiquer la pression au moyen d'un flotteur équilibré par un contre-poids,

à l'aide d'un fil très-flexible passant sur une petite poulie très-mobile.

Pour graduer l'échelle d'un manomètre à air comprimé (fig. 66), on se sert de la formule

Fig. 66.

$$P = 2h + 0{,}76\,\frac{H}{H-h}, \qquad (Int., 1570)$$




D'où (*Int.*, 488)

$$h = \frac{P}{4} + \frac{H}{2} - \sqrt{\left(\frac{P}{4} + \frac{H}{2}\right)^2 - H\,\frac{P - 0{,}76}{2}}.$$

P pression absolue de la vapeur, en hauteur de mercure ;

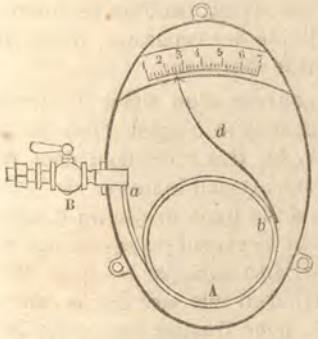
H = AD longueur de tube occupée par l'air sous la pression atmosphérique $0^m,76$ ;

$h$ = DD′ quantité dont H se comprime quand la pression passe de $0^m,76$ à P ; c'est la moitié de la différence de niveau du mercure dans les deux branches, qu'on suppose avoir même diamètre.

Donnant à P différentes valeurs, on en conclura les valeurs correspondantes de $h$. Pour $P = 5$ *atmos.* $= 3^m,80$ de mercure, supposant $H = 0^m,60$, on conclut de la dernière formule $h = 0^m,443$. Comme vérification, en substituant cette valeur de $h$ dans la première formule, on en conclurait bien $P = 3^m,80$.

*Manomètre métallique* de M. E. Bourdon. Ce manomètre, entièrement métallique et sans mercure, est basé sur ce principe : lorsqu'un tube métallique est enroulé en hélice, toute augmentation de pression intérieure ou diminution de pression extérieure le déroule, et au contraire toute diminution de pression intérieure ou augmentation de pression extérieure l'enroule davantage. Aussi M. Bourdon construit-il également des baromètres d'après ce principe.

Fig. 67.




La fig. 67 représente le manomètre de M. Bourdon. Le tube A est en laiton bien homogène ; sa longueur est de $0^m,70$, et sa section est une ellipse ayant 11 et 4 millimètres pour axes ; il est enroulé dans le sens de son petit axe sur un peu moins de deux spires. Son extrémité $a$ est fixée à une tubulure à robinet B, qui permet de le mettre en communication avec la chaudière ou le récipient dont le manomètre doit indiquer la pression intérieure. L'extrémité $b$ est fermée et tout à fait libre ; elle porte une aiguille $d$ qui se meut sur un cadran que l'on a gradué en atmosphères et fractions d'atmosphères à l'aide d'un manomètre étalon à air libre, en faisant fonctionner l'appareil avec de l'air com-

primé. Le tout est renfermé dans une caisse en fonte qui préserve l'appareil des chocs et permet de le fixer où l'on veut.

Ce manomètre est très-portatif, peu volumineux, nullement fragile, et il ne coûte que 50 fr. Toutes les locomotives en sont munies aujourd'hui.

L'administration a commandé à M. Bourdon des *manomètres vérificateurs*, gradués jusqu'à 18 atmosphères, et le 26 août 1852 elle en a adressé à tous les ingénieurs chargés de la surveillance des appareils à vapeur, pour leur servir à vérifier les différents instruments manométriques employés sur les chaudières.

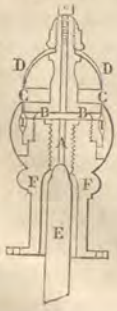
M. Bourdon a construit des manomètres de son système indiquant des pressions s'élevant à 200 ou 300 atmosphères, et qui trouvent leur emploi dans la solidification des gaz (281).

Enfin M. Bourdon a imaginé un baromètre métallique fondé sur le même principe que son manomètre. Seulement le tube est fixé au support par son milieu, et il est fermé complétement à ses extrémités. De plus, on y a fait un vide aussi parfait que possible, à un millimètre de mercure; d'où il résulte que, selon que la pression atmosphérique augmente ou diminue, le tube se ferme ou s'ouvre, et on profite du mouvement de ses extrémités pour faire tourner une aiguille sur un cadran barométrique. La section du tube, au lieu d'être elliptique, est formée de deux arcs de cercle.

**318.** *Alimentation des chaudières à vapeur. Indicateur du niveau de l'eau dans ces chaudières.* Toute chaudière à vapeur doit être munie d'une pompe d'alimentation bien construite et en bon état d'entretien ou de tout autre appareil alimentaire d'un effet certain.

Le niveau que l'eau doit avoir habituellement dans chaque chaudière est indiqué à l'extérieur par une ligne tracée d'une manière apparente sur le corps de la chaudière ou sur le parement du fourneau. Cette ligne, que nous appellerons *ligne de niveau d'eau*, est d'un décimètre au moins au-dessus de la partie la plus élevée des carneaux, tubes ou conduits de la flamme et de la fumée dans le fourneau.

Fig. 68.

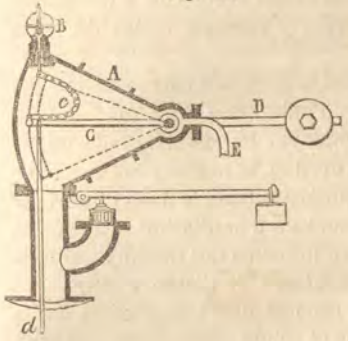



Chaque chaudière est pourvue d'un sifflet d'alarme (*fig.* 68), qui se fixe à la chaudière à l'aide d'une bride que porte le manchon FF. La tige E descend dans la chaudière et porte un flotteur. Quand le niveau de l'eau baisse de 0$^{m}$,05 au-dessous de la ligne de niveau d'eau, la tige E descend et permet à la vapeur de passer par le canal A; la vapeur du canal A se rend, par les trous BB, dans le canal annulaire II, d'où elle sort par la fente circulaire très-étroite CC, pour frapper les bords du timbre ou cloche renversée DD et produire un sifflement très-aigu. Le flotteur, qui est ordinairement une pierre de liais du poids de 23 kilog. environ, et la tige E sont

équilibrés par un contre-poids; celui-ci ainsi que son levier, qui repose sur des couteaux, sont placés dans la chaudière.

La fig. 69 représente, à l'échelle de 1/6, la disposition adoptée par M. E. Bourdon, constructeur à Paris, pour le sifflet d'alarme, l'indicateur de niveau et la soupape de sûreté.

Fig. 69.




A boîte en fonte à nervures pour résister à la pression de la vapeur, fixée sur la chaudière par une bride à 5 boulons;

B sifflet d'alarme; la soupape qui le ferme est ramenée sur l'ouverture par un ressort à boudin;

C levier du flotteur; quand le niveau baisse, ce levier, par l'intermédiaire de la chaîne en cuivre *c*, système de Gall, très-flexible, fait baisser la soupape qui ferme le sifflet;

D levier du contre-poids du flotteur; il est monté sur l'axe du levier C, en dehors de la caisse, et il se prolonge latéralement à la caisse par une aiguille, qui indique par sa position le niveau dans la chaudière. Avec cette disposition, le flotteur, au lieu de vaincre directement le frottement de la tige *d* du flotteur dans le stuffing-box, comme cela a lieu ordinairement, le vainc par l'intermédiaire d'un levier, ce qui le rend plus sensible. M. Bourdon, en faisant l'axe du levier C à embase conique, qui s'applique contre l'intérieur de la caisse du côté qui porte le levier D, et en le poussant par son autre extrémité à l'aide d'une pointe conique qui se visse dans une plaque appliquée latéralement à la caisse, évite la boîte à étoupe; une simple rondelle de cuir, de feutre ou d'étoupe, forme le joint de cette plaque. La chaîne *c* doit être verticale quand elle ouvre la soupape du sifflet.

E tube établissant la communication entre la chaudière et le manomètre, ou servant à une prise quelconque de vapeur.

Outre le flotteur d'alarme, la chaudière est munie de l'un des trois appareils suivants : 1° un flotteur ordinaire d'une mobilité suffisante; 2° un tube indicateur en verre; 3° des robinets indicateurs convenablement placés à des niveaux différents. Ces appareils indicateurs doivent, dans tous les cas, être placés en vue du chauffeur (304).

Si plusieurs chaudières sont destinées à fonctionner ensemble, elles doivent être disposées de manière à pouvoir, au besoin, être rendues indépendantes les unes des autres. En conséquence, chaque chaudière doit être alimentée séparément, et être munie de tous les appareils de sûreté.

**319.** *Division des chaudières à vapeur en quatre catégories. Emplacement des chaudières à vapeur.* Exprimant en mètres cubes la capacité de la chaudière avec ses tubes bouilleurs, et en atmosphères la tension absolue de la vapeur dans la chaudière (313), et faisant le produit des

deux nombres, *les chaudières sont dites de la première catégorie, si le produit est plus grand que* 15; *elles sont de la deuxième catégorie, si le produit surpasse* 7 *et n'excède pas* 15; *de la troisième, s'il est supérieur à* 3 *sans excéder* 7, *et enfin de la quatrième, s'il n'excède pas* 3.

Si plusieurs chaudières doivent fonctionner ensemble dans un même emplacement, et s'il existe entre elles une communication quelconque, directe ou indirecte, on prend, pour déterminer l'ordre de la catégorie, la somme des capacités de ces chaudières, y compris celles de leurs tubes bouilleurs.

Les chaudières à vapeur comprises dans la première catégorie doivent être établies en dehors de toute maison d'habitation et de tout atelier. Néanmoins, pour laisser la faculté d'employer au chauffage des chaudières une chaleur qui autrement serait perdue, le préfet peut autoriser l'établissement des chaudières de la première catégorie dans l'intérieur d'un atelier qui ne fait pas partie d'une maison d'habitation. L'autorisation est portée à la connaissance de notre ministre des travaux publics.

Toutes les fois qu'il y a moins de 10 mètres de distance entre une chaudière de la première catégorie et les maisons d'habitation ou la voie publique, il est construit, en bonne et solide maçonnerie, un mur de défense de 1 mètre d'épaisseur. Ce mur de défense est, dans tous les cas, distinct du massif des fourneaux, et en est séparé par un espace libre de 50 centimètres de largeur au moins. Il doit également être séparé des murs mitoyens avec les maisons voisines.

Si la chaudière est enfoncée dans le sol, et établie de manière que sa partie supérieure soit à un mètre au moins en contre-bas du sol, le mur de défense n'est exigible que lorsqu'elle se trouve à moins de 5 mètres des maisons habitées ou de la voie publique.

Lorsqu'une chaudière de la première catégorie est établie dans un local fermé, ce local ne doit point être voûté; mais il doit être couvert d'une toiture légère n'ayant aucune liaison avec les toits des ateliers ou autres bâtiments contigus, et reposant sur une charpente particulière.

Les chaudières à vapeur comprises dans la deuxième catégorie peuvent être placées dans l'intérieur d'un atelier, si toutefois cet atelier ne fait pas partie d'une maison d'habitation ou d'une fabrique à plusieurs étages. Si les chaudières de cette catégorie sont à moins de 5 mètres de distance, soit des maisons d'habitation, soit de la voie publique, il est construit de ce côté le mur de défense dont il vient d'être question pour les chaudières de la première catégorie.

A l'égard des terrains contigus non bâtis appartenant à des tiers, si, après l'autorisation donnée par le préfet pour l'établissement des chaudières de la première ou de la seconde catégorie, les propriétaires de ces terrains font bâtir dans les distances citées plus haut, ou si ces terrains viennent à être consacrés à la voie publique, la construction de

murs de défense, tels qu'ils sont prescrits ci-dessus, peut, sur la demande des propriétaires desdits terrains, être imposée au propriétaire de la chaudière, par arrêté du préfet, sauf recours devant notre ministre des travaux publics.

L'autorisation donnée par le préfet pour les chaudières de la première et de la deuxième catégorie indique l'emplacement de la chaudière, et la distance à laquelle elle doit être placée par rapport aux habitations appartenant à des tiers et à la voie publique, et fixe, s'il y a lieu, la direction de l'axe des chaudières. Cette autorisation détermine la situation et les dimensions en hauteur et en largeur du mur de défense d'un mètre, lorsqu'il est nécessaire de l'établir. Dans la fixation de ces dimensions, on a égard à la capacité de la chaudière, au degré de tension de la vapeur, et à toutes les autres circonstances qui peuvent rendre l'établissement de la chaudière plus ou moins dangereux ou incommode.

Les chaudières de la troisième catégorie peuvent être placées dans l'intérieur d'un atelier ne faisant pas partie d'une maison, sans que le mur de défense soit exigé.

Les chaudières de la quatrième catégorie peuvent être placées dans l'intérieur d'un atelier quelconque, lors même que cet atelier fait partie d'une maison d'habitation. Dans tous les cas, les chaudières sont munies d'un manomètre à air libre (317).

Les fourneaux des chaudières à vapeur comprises dans la troisième et dans la quatrième catégorie sont entièrement séparés, par un espace vide de 50 centimètres au moins des maisons d'habitation appartenant à des tiers.

Lorsque les chaudières établies dans l'intérieur d'un atelier ou d'une maison d'habitation sont couvertes, sur le dôme et sur les flancs, d'une enveloppe destinée à prévenir les déperditions de chaleur, cette enveloppe est construite en matériaux légers; si elle est en briques, son épaisseur ne doit pas dépasser un décimètre.

320. *Machines à vapeur employées dans l'intérieur des mines.* Les machines à vapeur employées à demeure dans l'intérieur des mines sont pourvues des appareils de sûreté prescrits dans les numéros précédents pour les machines fixes, et doivent subir les mêmes épreuves. Elles ne peuvent être établies qu'en vertu d'autorisations du préfet, délivrées sur le rapport des ingénieurs des mines. Ces autorisations déterminent les conditions relatives à l'emplacement, à la disposition et au service habituel des machines.

Les attributions données aux préfets des départements par les ordonnances des 22 et 23 mai (312), sont exercées par le préfet de police dans toute l'étendue du département de la Seine, et dans les communes de Saint-Cloud, Meudon et Sèvres, du département de Seine-et-Oise.

## DISTILLATION.

**321.** La distillation a pour but de séparer une substance volatile d'une ou de plusieurs autres substances fixes, ou volatiles à des températures différentes.

Pour ce mode de vaporisation, les dimensions des chaudières dépendent de la quantité de vapeur à former dans un temps donné, de la température d'ébullition du liquide (270), de sa chaleur latente de vaporisation (269), et de sa capacité calorifique, ainsi que de celle du résidu (266). De ces divers éléments, on déduit aussi la quantité de combustible à brûler (282), et par suite la surface de la grille (301) et la section de la cheminée (295).

Les surfaces de chauffe nécessaires pour vaporiser, dans un même temps, un même poids d'un liquide quelconque et d'eau, sont dans le rapport des quantités de chaleur absorbées pour échauffer et vaporiser les deux liquides. Quand il y a plusieurs liquides à vaporiser à la fois, ce qui a lieu généralement, la quantité totale de charbon à brûler est égale à celle nécessaire pour vaporiser tous les liquides séparément, et amener le résidu à la température d'ébullition. La surface de chauffe est aussi égale à la surface que nécessiterait la vaporisation de tous les liquides en particulier et l'échauffement du résidu.

1^er^ *exemple.* Soit à vaporiser, en une heure, 150 kilog. d'alcool pur à la température primitive de 0°.

La température d'ébullition de l'alcool sous la pression atmosphérique $0^m,76$ étant 78°,40, sa capacité calorifique 0,622, et sa chaleur latente de vaporisation 207, la quantité de chaleur nécessaire pour en vaporiser un kilogramme est

$$78,40 \times 0,622 + 207 = 256 \text{ unités},$$

c'est-à-dire à peu près les 4/10 de celle nécessaire pour vaporiser 1 kil. d'eau préalablement à 0° (269).

Un kilog. de houille vaporisant 6 kilog. d'eau, il vaporisera donc $6 \times \frac{10}{4} = 15$ kilog. d'alcool.

Un mètre carré de surface de chauffe vaporisant de 15 à 20 kilog. d'eau, il vaporisera donc de $15 \times \frac{10}{4} = 38$, à $20 \times \frac{10}{4} = 50$ kilog. d'alcool. En supposant seulement 38 kilog., les 150 kilog. d'alcool à 0° exigeront $\frac{150}{38} = 4^{mc},95$ de surface de chauffe, et la quantité de houille brûlée sera $\frac{150}{15} = 10$ kilog.

2e *exemple.* Soit à distiller en une heure 500 litres d'un vin dans lequel les quantités d'alcool et d'eau sont dans le rapport de 1 à 22,8.

L'expérience prouve que pour obtenir presque tout l'alcool, il faut vaporiser les 0,22 de la masse totale, ce qui donne 110 litres d'une liqueur composée de 21 litres d'alcool et de 89 litres d'eau.

La quantité de houille à brûler est alors :

Pour vaporiser les $0{,}792 \times 21 = 16{,}63$ kilog. d'alcool (45). $\frac{16{,}63}{15} = 1^{k},11$

Pour vaporiser les 89 kilog. d'eau. . . . . $\frac{89}{6} = 14{,}83$

Pour élever à 100° les 390 kilog. de résidu. . . . . $\frac{100 \times 390}{650 \times 6} = 10{,}00$

Total. . . . . 25,94

$25^{k},94$ de houille pouvant vaporiser $25^{k},94 \times 6 = 155^{k},64$ d'eau, la surface de chauffe nécessaire pour distiller les 500 litres de vin sera donc de $\frac{155{,}64}{15} = 10^{mc},38$.

L'eau-de-vie qui sert de boisson contient généralement de 50 à 60 pour 100 en volume d'alcool pur, à la température de 15°; ce que dans le commerce on appelle *esprit* en contient de 70 à 80 pour 100, à la même température. Les vins du midi donnent plus d'eau-de-vie que ceux du nord; on en retire jusqu'à 1/3 des premiers, moyennement 1/4, au lieu que ceux du centre n'en donnent que 1/5, et ceux du nord seulement de 1/8 à 1/10.

Lorsqu'on distille une matière quelconque, on dépense une certaine quantité de chaleur pour l'amener à la température d'ébullition. Dans un grand nombre de cas, on peut obtenir cette élévation de température au moyen de la chaleur provenant de la condensation des vapeurs, ce qui constitue une véritable économie de combustible.

**322.** *Condensation des vapeurs.* On peut admettre : 1° que pour une même vapeur, la quantité condensée par une même surface est proportionnelle à la différence entre la température de la vapeur et celle de l'air ou de l'eau qui sert de réfrigérant; 2° que pour des vapeurs différentes, les quantités condensées, par une même surface et pour un même excès de température, sont en raison inverse des quantités de chaleur contenues dans un même poids des vapeurs (269).

*TABLEAU de la quantité de vapeur d'eau condensée en une heure, par un mètre carré de surface de quelques matières en contact avec l'air à 15°, ou avec l'eau à 20 ou 25°.*

| NATURE DES SURFACES. | VAPEUR D'EAU CONDENSÉE PAR | |
|---|---|---|
| | l'air à 15°. | l'eau à 20 ou 25°. |
| | k. | k. |
| Fonte de 5 à 6 millimètres d'épaisseur. . . . . | 1.80 | » |
| Cuivre de 2 à 3 millimètres d'épaisseur. . . . | 1.40 | 1.07 |
| Fer-blanc. . . . . | 1.07 | » |
| Tôle. . . . . | 1.82 | » |
| Verre. . . . . | 1.76 | » |

A l'aide de ce tableau, et en appliquant les deux lois qui le précèdent, on déterminera facilement la quantité d'une vapeur quelconque ou d'un mélange de plusieurs vapeurs, qui sera condensée par les surfaces du tableau, pour un excès de température donné.

### ÉVAPORATION.

**323.** *Évaporation spontanée à l'air libre.* Cette évaporation, que l'on n'emploie guère que dans l'extraction du sel marin, est d'autant plus active : 1° que la surface des liquides est plus grande ; 2° que la température du liquide à évaporer et de l'air environnant ou de l'un de ces deux corps seulement est plus grande ; 3° que l'air est plus sec et plus rapidement renouvelé.

D'après M. Payen, dans les marais salants, en faisant usage de ce mode d'évaporation, l'extraction de 1000 kilog. de sel coûte de 6 à 25 francs, suivant les localités et les états de l'atmosphère. En évaporant l'eau à l'aide de la houille, comme l'eau de mer contient à peu près 0,025 de sel marin, pour obtenir 1000 kilog. de sel, il faudrait évaporer $\frac{1000}{0,025} \times 0,975 = 39\,000$ kilog. d'eau, qui exigeraient $\frac{39000}{5} = 7800$ kilog. de houille. Supposant que l'hectolitre de houille de 80 kilog. coûte 3 fr., le combustible brûlé pour obtenir 1000 kilog. de sel coûterait 292 fr. 50 cent.

**324.** *Évaporation par courant d'air forcé.* Ce genre d'évaporation ne s'emploie guère que pour la concentration des jus de fruits. Montgolfier en a fait usage le premier, pour concentrer des marcs de raisin avant leur fermentation tout en leur conservant leurs principes fermentescibles. Il résulte de ses observations, qu'en automne un mètre cube d'air dissout moyennement 3 grammes d'eau. Un homme, par un

travail effectif journalier de 6 heures, pouvant, à l'aide d'une machine, imprimer une vitesse de 5 mètres par seconde à environ 70 000 mètres cubes d'air, la quantité d'eau qu'il évaporera en un jour sera donc de $70\,000 \times 0{,}003 = 210$ kilog. En diminuant de moitié la vitesse imprimée à l'air, on pourrait quadrupler la quantité d'air mise en mouvement, et par là diminuer considérablement le prix de revient de ce mode d'évaporation.

325. *Évaporation à l'air libre et à l'aide d'un foyer.* Quelle que soit la température à laquelle un liquide se vaporise, on admet ordinairement que la quantité de chaleur absorbée par sa vaporisation est la même qu'à sa température d'ébullition; mais, comme le remarque M. Péclet, la quantité de chaleur absorbée augmente rapidement à mesure que la température diminue, et cela, à cause de l'échauffement de l'air qui dissout la vapeur et du rayonnement.

*TABLEAU de la quantité de chaleur contenue dans un mètre cube d'air saturé à différentes températures et sous la pression* 0m.76.

| TEMPÉRATURE de l'air saturé. | TENSION de la vapeur (272). | TENSION de l'air (274). | POIDS de la vapeur (275). | POIDS de l'air (44 et 262). | CHALEUR de la vapeur (269). | CHALEUR de l'air (267). | CHALEUR totale. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | m. | m. | k. | k. | unités. | unités. | unités. |
| 20° | 0.017 | 0.743 | 0.016 | 1.18 | 10 | 6.0 | 16.0 |
| 30 | 0.032 | 0.728 | 0.028 | 1.13 | 18 | 8.4 | 26.4 |
| 40 | 0.055 | 0.705 | 0.046 | 1.05 | 30 | 10.5 | 40.5 |
| 50 | 0.092 | 0.668 | 0.072 | 0.96 | 47 | 12.0 | 59.0 |
| 60 | 0.149 | 0.611 | 0.106 | 0.86 | 69 | 12.9 | 81.9 |
| 70 | 0.233 | 0.527 | 0.142 | 0.72 | 92 | 12.6 | 104.6 |
| 80 | 0.355 | 0.405 | 0.199 | 0.53 | 129 | 10.6 | 139.6 |
| 90 | 0.525 | 0.235 | 0.251 | 0.30 | 163 | 6.75 | 169.75 |

En admettant que la vapeur ne se dégage dans l'air que quand celui-ci s'en est saturé à la température du liquide ou de la vapeur, on déterminera facilement, au moyen du tableau précédent, les quantités de chaleur absorbées par la vaporisation d'un kilog. d'eau à différentes températures, y compris l'échauffement de l'air. La deuxième colonne du tableau suivant, *extrait du traité de la chaleur de M. Péclet*, donne ces quantités de chaleur; la troisième colonne donne les pertes dues au rayonnement, aussi pour un kilog. d'eau vaporisée, et la quatrième, les quantités totales de chaleur absorbées.

| TEMPÉRATURES. | UNITÉS. | UNITÉS. | UNITÉS. |
|---|---|---|---|
| 20° | 1000 | 381 | 1381 |
| 30 | 942 | 331 | 1273 |
| 40 | 880 | 252 | 1132 |
| 50 | 819 | 185 | 1004 |
| 60 | 772 | 139 | 911 |
| 70 | 736 | 102 | 838 |
| 80 | 701 | 75 | 776 |
| 90 | 676 | 56 | 732 |

*TABLEAU de la quantité totale de chaleur moyennement absorbée par l'évaporation d'un kilogramme d'eau à différentes températures, y compris le rayonnement et l'échauffement de l'air, d'après les expériences de M. Péclet.*

| TEMPÉRATURE. | CHALEUR ABSORBÉE. |
|---|---|
| | unités. |
| de 58°.25 à 55°.25 | 724 |
| de 55 .25 à 52 | 780 |
| de 52 à 48 .50 | 837 |
| de 48 .50 à 44 .75 | 893 |
| de 44 .75 à 40 .75 | 949 |
| de 40 .75 à 36 .25 | 1063 |
| de 36 .25 à 31 .25 | 1176 |

*TABLEAU des poids de vapeur formés en une heure par un mètre carré de surface d'eau à différentes températures, dans un air calme.*

| TEMPÉRATURE. | POIDS D'EAU VAPORISÉ. | TEMPÉRATURE. | POIDS D'EAU VAPORISÉ. |
|---|---|---|---|
| | k. | | k. |
| 20° | 0.32 | 60° | 2.71 |
| 30 | 0.57 | 70 | 4.32 |
| 40 | 1.00 | 80 | 6.64 |
| 50 | 1.70 | 90 | 10.00 |

Dans les énormes chaudières employées aux salines de Dieuze, suivant que le liquide est en ébullition ou non, la houille brûlée pour obtenir 100 kilog. de sel est de 36 à 38 kilog. ou de 42 à 44 kilog. Les surfaces de grille et de chauffe sont à peu près le double de ce qu'elles seraient dans une chaudière à vapeur ordinaire pour une même consommation de combustible (301 et 307). La cheminée a une section supérieure à celle que donnerait la formule (*c*) (295) en négligeant la ré-

sistance, qui est très-faible, de la fumée avant son entrée dans la cheminée; elle a 18 mètres de hauteur sur 1 mètre de côté en bas, et $0^m,60$ en haut; elle est commune à quatre foyers qui consomment chacun 52 kilog. de houille à l'heure; la température de la fumée y est de 100°. Chaque kilog. de houille vaporise $7^k,50$ d'eau.

**326.** *Évaporation des liquides chauffés par la vapeur.* Lorsqu'on évapore un liquide dans un appareil à double fond, dans lequel on fait arriver de la vapeur d'eau, on peut admettre que chaque mètre carré de surface peut condenser 3 kilog. de vapeur à l'heure pour une différence de température de 1 degré, et que pour les appareils en serpentin, cette condensation s'élève à 8 kil., si le diamètre du serpentin est de 25 à 35 millimètres pour un développement qui ne dépasse pas 20 à 30 mètres.

*Exemple.* Soit à concentrer en une heure 5000 kilog. de clairce, c'est-à-dire de sirop avant la cuisson. Ce sirop, composé ordinairement de 30 parties d'eau pour 70 parties de sucre, pour être amené à 47° de l'aréomètre, degré ordinaire de concentration, perd à peu près 15 pour 100 d'eau; ce qui fait 750 kilog. pour 5000 kilog. de sirop. La température d'ébullition de la clairce étant 110° et sa chaleur spécifique moitié de celle de l'eau, la quantité de chaleur nécessaire pour en élever 5000 kilog. de 20° à 110° est $\frac{5000 \times 90}{2} = 225000$ unités; ce qui correspond à la chaleur dégagée par la condensation de $\frac{225000}{550} = 409^k,1$ de vapeur d'eau (269). La quantité totale de vapeur à fournir pour élever la température de la clairce de 20° à 110°, et lui faire perdre 15 pour 100 d'eau, est donc $750 + 409,1 = 1159,1$ kilog.

Supposons maintenant que la vapeur soit à la température de 142°,70; ce qui correspond à 3,75 atmosphères de pression (272). Pendant que la clairce s'échauffe, l'excès moyen de la température moyenne de la vapeur et de l'eau de condensation, sur la température moyenne de la clairce, est

$$\frac{142,70 + 20 + 142,70 + 110}{4} - \frac{110 + 20}{2} = 38°,85.$$

Pendant l'évaporation, la différence des températures de la vapeur et du liquide étant à peu près 27°, la durée totale de l'évaporation est la même que s'il s'agissait de condenser $750 + \frac{27}{38,85} 409,1 = 1034$ kilog. de vapeur avec une différence de température de 27°. En supposant que l'on condense dans des serpentins, la surface de chauffe sera donc $\frac{1034}{27 \times 8} = 4^{mc},79$, surface qui exige deux serpentins.

## SÉCHAGE.

**327.** *Séchage à l'air libre.* Les dispositions à adopter pour les bâtiments destinés à ce mode de séchage, usité principalement dans les blanchisseries, consistent : 1° à placer ces bâtiments dans un lieu où rien n'empêche la circulation de l'air; 2° à leur donner une grande élévation, afin que les matières à sécher se trouvent dans un air plus sec et plus agité; 3° à laisser une libre circulation à l'air sur toutes les faces du bâtiment. Pour les séchoirs à colle, comme il serait dangereux d'y laisser pénétrer l'air chargé de vapeur, on garnit les ouvertures du bâtiment de jalousies que l'on ferme pendant les temps humides.

**328.** *Séchage produit par un courant d'air chauffé préalablement.* Tous les problèmes auxquels donne naissance ce mode de séchage pourront être résolus en suivant la marche que nous allons indiquer dans la solution des deux problèmes suivants, dont l'un est la réciproque de l'autre.

*Premier problème.* Soit à déterminer la quantité d'eau vaporisée par un kilogramme de houille, l'air saturé sortant du séchoir à 10°, et la température de l'air extérieur, supposé sec, étant 0°.

A la température de 10° et sous la pression $0^m,76$, un mètre cube d'air contient $0^k,0095$ de vapeur dont la force élastique est $0^m,0095$ de mercure, et dont la formation a absorbé $0,0095 \times 650 = 6,175$ unités de chaleur (275, 272 et 269). Un mètre cube d'air sec à 0° et sous la pression $0^m,76$ pesant $1^k,3$, à 10° et sous la pression il pèse

$$\frac{1,3}{1+0,00367\times 10} = 1^k,254. \qquad (44 \text{ et } 262)$$

Le poids de l'air contenu dans un mètre cube d'air saturé à 10° est alors

$$1,254\,\frac{0,7505}{0,76} = 1^k,238. \qquad (262 \text{ et } 274)$$

La température de l'air sec à l'entrée du séchoir est

$$10° + \frac{6,175\times 4}{1,238} = 30°$$

(4 étant le rapport approché des puissances calorifiques de l'eau et de l'air (267)).

Supposant que 1 kilogramme de houille produise 6000 unités de chaleur, il pourra élever $\frac{6000\times 4}{30} = 800$ kilog. d'air de 0° à 30°, dont le volume en air saturé à 10° sera $\frac{800}{1,238} = 646,2$ mètres cubes; le poids d'eau vaporisé sera donc $646,2 \times 0,0095 = 6^k,139$.

Par des calculs semblables, supposant toujours l'air primitivement sec et à 0°, on trouverait que la quantité d'eau vaporisée par kilog. de houille croît sensiblement avec la température de l'air saturé; mais que pour un léger accroissement de cette température, celle de l'air à son entrée dans le séchoir augmente d'une quantité considérable.

*Deuxième problème.* Soit à évaporer 25 kilog. d'eau en une heure, la température de l'air saturé au sortir du séchoir étant 30° et la température de l'air saturé extérieur étant 15°.

Pour l'établissement des appareils destinés à opérer ce mode de séchage, il faut toujours se placer dans les conditions les plus défavorables d'état hygrométrique et de température de l'air extérieur; ainsi il convient de supposer cet air entièrement saturé, et à une température supérieure à la température moyenne à laquelle il se trouvera pendant tout le temps que fonctionnera l'appareil. Dans le nord de la France, pour un appareil permanent, il convient de supposer l'air extérieur à 15° et complétement saturé.

A 30° et sous la pression $0^m,76$, un mètre cube d'air saturé contient 28,51 grammes d'eau, et à 15° il en contient 12,83 grammes (275). Par conséquent, en négligeant la dilatation de l'air en passant de 15° à 30°, chaque mètre cube dissoudra 15,68 grammes d'eau. Pour dissoudre les 25 kilog., il faudra donc à peu près $\frac{25}{0,01568} = 1594$ mètres cubes d'air; ce volume, ramené de 30° à 0°, devient $\frac{1594}{1 + 0,00367 \times 30} = 1436$ mètres cubes, dont le poids est $1436 \times 1,3 = 1867$ kilog.

La quantité de chaleur que perd l'air chaud pour dissoudre les 25 kilog. d'eau est $650 \times 25 = 16250$ unités; sa température à l'entrée du séchoir est donc $30° + \frac{16250 \times 4}{1867} = 64°,8$.

La quantité totale de chaleur dépensée est

$$\frac{1867(64,8 - 15)}{4} = 23244.$$

Si l'air qui entre dans le séchoir a servi à la combustion, le poids de combustible à brûler s'obtient en divisant 23244 par la puissance calorifique du combustible; si au contraire l'air qui entre dans le séchoir n'a été chauffé qu'indirectement, il y a à peu près 20 pour 100 de la chaleur perdue (334), et le poids de combustible à brûler s'obtient en divisant 23244 par les 0,80 de la puissance calorifique. Ayant la quantité de combustible à brûler, on détermine la surface de la grille (301).

La formule générale (*c*) (295) peut, dans un grand nombre de cas, servir à calculer la section de la cheminée d'appel: quand, par exemple, la force ascensionnelle de l'air avant d'arriver au séchoir compense les frottements depuis le foyer jusqu'à la sortie du séchoir; car, alors, la

cheminée d'appel ne fait plus qu'évacuer l'air du séchoir, et vaincre les frottements de cet air contre ses parois ; cependant il convient d'augmenter la section que donne cette formule. Le plus souvent, on calcule la section de la cheminée d'appel de manière que la vitesse de l'air y soit de 2 mètres.

MM. Lacambre et Persac, dans une touraille continue construite à Louvain, ont établi, pour chauffer l'air, un calorifère dont la surface de chauffe est de 100 mètres carrés ; il brûle en 12 heures 400 kilog. de houille, et il sèche par jour 50 hectolitres de malt, renfermant chacun de 27 à 36 kilog. d'eau; ce qui donne seulement une évaporation de $1^k,7$ à $2^k,2$ d'eau par kilog. de houille. Ce peu d'effet est dû à ce qu'il est impossible de saturer complétement l'air dans le séchage des matières pulvérulentes.

**329.** *Séchage par l'air froid préalablement desséché.* Ce mode de dessiccation peut s'appliquer à la colle, qui ne peut supporter, lorsqu'elle est en gelée, qu'une température de 35° environ.

Supposons, par exemple, qu'il s'agisse d'obtenir 500 kilog. de colle sèche, l'air desséché étant à 10°. La colle en gelée contenant des 2/3 aux 5/6 de son poids d'eau, il faudra donc, en adoptant la proportion 2/3, qui est celle des colles communes, pour obtenir les 500 kilog. de colle sèche, évaporer 1000 kilog. d'eau; or, un mètre cube d'air saturé à 10° contenant $9^g,5$ d'eau (275), il faudra donc, pour dissoudre les 1000 kilog. d'eau, faire passer sur la colle $\frac{1000}{0,0095} = 105263$ mèt. cubes d'air sec.

Pour faire l'appel de ces 105263 mètres cubes d'air, il faudrait brûler environ 100 kilog. de houille, qui coûteraient 5 fr. à Paris; au moyen d'un ventilateur, cet appel pourrait coûter 4 fr. (299).

La perte sur la chaux employée à dessécher l'air ne peut qu'être faible, si l'on a soin de ne lui faire absorber que la moitié de son poids d'eau ; car, à cet état, elle est encore propre aux constructions.

**330.** *Séchage des étoffes par le contact des surfaces métalliques.* Clément, en appliquant une pièce de calicot, pesant $2^k,50$ et contenant un égal poids d'eau, sur une plaque de cuivre d'une surface égale à la sienne, et chauffée par la vapeur à 100°, a obtenu sa dessiccation en une minute. Dans cette expérience, la quantité d'eau évaporée par mètre carré de surface de cuivre a été de $6^k,94$ par heure.

Dans les fabriques, on sèche les étoffes en les faisant passer sur des cylindres en fonte chauffés intérieurement par la vapeur.

D'après des expériences faites par M. Royer, vingt pièces de calicot sortant de la presse et pesant 150 kilog. ont été séchées en 3 heures 1/2; leur poids a été réduit à 76 kilog., et les 74 kilog. d'eau ont condensé 102 kilog. de vapeur; de sorte que, en admettant qu'un kilog. de houille

produit 5 kilog. de vapeur, la quantité d'eau vaporisée par kilogramme de houille a été de $5\,\frac{74}{102} = 3^k,63$.

La machine était à un seul cylindre, l'eau de condensation était bouillante et la pression dans la chaudière était de $1^m,37$ de mercure (272).

## CHAUFFAGE.

**331.** Avant de passer en revue les différents modes de chauffage, nous croyons devoir rapporter succinctement dans ce numéro les résultats obtenus par M. Péclet dans des expériences récentes (extrait du *Supplément à la seconde édition du traité de la chaleur*).

1° *Perte de chaleur due au rayonnement* (249). La température d'un corps restant constante et comprise entre 25° et 65°, et celle de l'enceinte étant de 12°, la quantité de chaleur émise par rayonnement par mètre carré et par heure est

$$R = kt(1 + 0{,}005\,6t). \qquad (1)$$

$t$ excès constant de la température du corps sur celle de l'enceinte;
$k$ nombre constant qui dépend de la nature de la surface du corps, et dont la valeur est indiquée au tableau suivant :

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Argent poli. . . . . | 0.13 | Tôle oxydée. . . . . | 3.36 | Noir de fumée. . . . | 4.01 |
| Papier argenté. . . . | 0.42 | Fonte neuve. . . . | 3.17 | Pierre à bâtir. . . . | 3.60 |
| Laiton poli. . . . . | 0.24 | Fonte oxydée. . . . | 3.36 | Plâtre. . . . . | 3.60 |
| Papier doré. . . . . | 0.23 | Verre. . . . . | 2.91 | Bois. . . . . | 3.60 |
| Cuivre rouge. . . . | 0.16 | Craie en poudre. . | 3.32 | Étoffes de laine. . . | 3.68 |
| Zinc. . . . . | 0.24 | Poussière de bois. . | 3.53 | Calicot. . . . . | 3.65 |
| Étain. . . . . | 0.215 | Charbon en poudre. | 3.42 | Étoffes de soie. . . . | 3.71 |
| Tôle polie. . . . . | 0.45 | Sable fin. . . . . | 3.62 | Eau. . . . . | 5.31 |
| Tôle plombée. . . . | 0.65 | Peinture à l'huile. | 3.71 | Huile. . . . . | 7.24 |
| Tôle ordinaire. . . . | 2.77 | Papier. . . . . | 3.77 | | |

Pour le papier et les étoffes la couleur est sans influence.

Pour des températures $t'$ de l'enceinte qui ne différeraient de 12° que de quelques unités, on multiplierait les valeurs de $k$ du tableau précédent par $1 + 0{,}003\,7(t' - 12)$.

D'après Dulong, la chaleur rayonnée est représentée par la formule

$$R = ma^{\theta}(a^t - 1). \qquad (2)$$

$\theta$ température de l'enceinte ;
$t$ excès de la température du corps sur celle de l'enceinte ;
$a$ nombre constant égal à 1,0077 ;
$m$ nombre constant qui dépend de la nature de la surface du corps, et que, d'après les expériences de M. Péclet, il convient de faire égal à $124.72\,k$.

Dulong a vérifié sa formule pour des excès de température s'élevant usqu'à 260°, et M. Péclet conseille de l'employer toutes les fois que la

température de l'enceinte différera notablement de 12° et quand l'excès de température ne sera pas compris entre 25° et 65°.

2° *Perte de chaleur due au contact de l'air.* Cette perte est indépendante de la nature de la surface du corps et de la température de l'enceinte; elle ne dépend que de l'excès de la température du corps sur celle de l'enceinte, et de la forme et des dimensions du corps. Dans tous les cas, elle est représentée, pour un excès de température compris entre 25° et 65°, pour un mètre carré et pour une heure, par la formule

$$A = k't(1 + 0{,}007\,3t). \qquad (3)$$

$t$ excès constant de température;

$k'$ nombre qui varie avec la forme et la dimension du corps, et qui est égal à $4{,}778 + \frac{0.13}{r}$ pour les corps sphériques de rayon $r$, à $2{,}058 + \frac{0{,}0382}{r}$ pour les cylindres horizontaux de rayon $r$, à $\left(0{,}726 + \frac{0{,}0345}{\sqrt{r}}\right)\left(2{,}43 + \frac{0{,}8758}{\sqrt{h}}\right)$ pour les cylindres verticaux de rayon $r$ et de hauteur $h$, et à $4{,}764 + \frac{0{,}636}{\sqrt{h}}$ pour les surfaces planes verticales de hauteur $h$.

Dulong a donné la formule suivante pour exprimer la perte de chaleur due au contact de l'air

$$A = m't^{1{,}233}. \qquad (4)$$

$t$ excès constant de température;

$m'$ nombre que M. Péclet conseille de faire égal à $0.552\,k'$.

Cette formule de Dulong s'accorde parfaitement avec les expériences de M. Péclet, et comme elle a été vérifiée pour de grands excès de température, il y a lieu de l'employer toutes les fois que l'excès de température dépassera 65°.

3° *La perte totale de chaleur due au rayonnement et au contact de l'air* est donc, pour des excès $t$ de température compris entre 25° et 65° et pour une température de l'enceinte très-peu différente de 12°,

$$M = R + A = kt(1 + 0{,}005\,6t) + k't(1 + 0{,}007\,3t) \qquad (5)$$

ou, à très-peu près, pour les corps à surfaces ternes,

$$M = (k + k')\,t(1 + 0{,}006\,5t). \qquad (6)$$

Dans toutes les autres circonstances, on pourra poser

$$M = R + A = ma^0(a^t - 1) + m't^{1{,}233}. \qquad (7)$$

Il résulte d'expériences faites sur une grande échelle, que la *chaleur transmise par un tuyau renfermé dans un canal parcouru par l'air* est sensiblement la même que celle que le tuyau perdrait à l'air libre (formules (5), (6) et (7)), en prenant pour $t$ l'excès de la température

du tuyau sur la température moyenne de l'air qui parcourt le canal. Le rayonnement du cylindre échauffe la surface intérieure du canal, et l'air s'échauffe par son contact avec la surface de ce canal; ce qui fait que la chaleur acquise par l'air est égale à celle que perd le cylindre par contact et par rayonnement. Ce cas se présente dans un grand nombre de calorifères.

La section du canal n'ayant que peu ou point d'influence, si le tuyau circule dans une pièce à chauffer, la chaleur transmise conserve la même expression.

*Lorsque l'air qui s'échauffe circule à l'intérieur du tuyau*, circonstance qui se présente dans un grand nombre de calorifères à air chaud, le refroidissement du tuyau par rayonnement disparaît complétement, et on peut admettre, sans erreur sensible, que la quantité de chaleur transmise à l'air par le tuyau est égale à celle qui passerait dans l'air si le tuyau était exposé à l'air libre, formules (5), (6) et (7), dans lesquelles $t$ représente, comme dans le cas précédent, l'excès de la température du cylindre sur la température moyenne de l'air à l'entrée et à la sortie.

4° *Transmission de la chaleur à travers les corps.* La quantité de chaleur qui traverse une plaque à surfaces planes et parallèles, est, par mètre carré et par heure,

$$M = (t - t')\frac{C}{E}. \qquad (8)$$

$t$ et $t'$ températures constantes des surfaces de la plaque;
E épaisseur de la plaque;
C est la valeur de M pour $t - t' = 1°$ et pour $E = 1$ mètre; le tableau suivant donne cette valeur pour différents corps.

| DÉSIGNATION DES MATIÈRES. | DENSITÉS. | VALEUR DE C. |
|---|---|---|
| 1° *Matières continues, ou dont les parties sont agglomérées.* | | |
| Cuivre | » | 64.00 |
| Fer | » | 29.00 |
| Zinc | » | 28.00 |
| Plomb | » | 14.00 |
| Charbon des cornues à gaz | 1.61 | 4.96 |
| Marbre gris à grains fins | 2.68 | 3.48 |
| Marbre blanc saccharoïde à gros grains | 2.77 | 2.78 |
| Pierre calcaire à grains fins | 2.34 | 2.08 |
| *Id.* | 2.27 | 1.69 |
| *Id.* | 2.17 | 1.70 |
| Pierre de liais à bâtir à gros grains | 2.24 | 1.32 |
| *Id.* | 2.22 | 1.27 |
| Plâtre ordinaire gâché | » | 0.331 |
| *Id.* très-fin gâché | 1.25 | 0.520 |

| DÉSIGNATION DES MATIÈRES. | DENSITÉS. | VALEUR DE C. |
|---|---|---|
| Plâtre de moulage très-fin, gâché. | 1.25 | 0.44 |
| Plâtre aluné, gâché. | 1.73 | 0.63 |
| Terre cuite. | 1.98 | 0.69 |
| *Id.* | 1.85 | 0.51 |
| Bois de sapin, transmission perpendiculaire aux fibres. | 0.48 | 0.093 |
| *Id.* parallèle aux fibres. | 0.48 | 0.170 |
| Bois de noyer, transmission perpendiculaire aux fibres. | » | 0.103 |
| *Id.* parallèle aux fibres. | » | 0.174 |
| Bois de chêne, transmission perpendiculaire aux fibres. | » | 0.211 |
| Liége. | 0.22 | 0.143 |
| Caoutchouc. | » | 0.170 |
| Gutta-percha. | » | 0.172 |
| Colle d'amidon. | 1.017 | 0.425 |
| Verre. | 2.44 | 0.75 |
| *Id.* | 2.55 | 0.88 |
| 2° *Matières pulvérulentes.* | | |
| Sable quartzeux. | 1.47 | 0.27 |
| Brique pilée, gros grains. | 1.0 | 0.139 |
| Brique pilée, passée au tamis de soie. | 1.16 | 0.165 |
| Brique en poudre fine obtenue par décantation. | 1.55 | 0.140 |
| Craie en poudre un peu humide | 0.92 | 0.108 |
| Craie en poudre lavée et séchée. | 0.85 | 0.086 |
| Craie en poudre lavée, séchée et comprimée. | 1.02 | 0.103 |
| Fécule de pomme de terre. | 0.71 | 0.098 |
| Cendres de bois. | 0.45 | 0.066 |
| Poudre de bois d'acajou. | 0.31 | 0.065 |
| Charbon de bois ordinaire en poudre. | 0.49 | 0.079 |
| Braise de boulanger en poudre passée au tamis de soie. | 0.25 | 0.068 |
| Charbon de bois ordinaire en poudre passée au tamis de soie. | 0.41 | 0.081 |
| Coke pulvérisé. | 0.77 | 0.160 |
| Limaille de fer. | 2.05 | 0.158 |
| Bioxyde de manganèse. | 1.46 | 0.163 |
| 3° *Matières filamenteuses.* | | |
| Coton en laine, quelle que soit sa densité. | » | 0.040 |
| Molleton de coton, *id.* | » | 0.040 |
| Calicot neuf, *id.* | » | 0.050 |
| Laine cardée, *id.* | » | 0.044 |
| Molleton de laine, *id.* | » | 0.024 |
| Édredon, *id.* | » | 0.039 |
| Toile de chanvre neuve. | 0.54 | 0.052 |
| *Id.* vieille. | 0.58 | 0.043 |
| Papier blanc à écrire. | 0.85 | 0.043 |
| Papier gris non collé. | 0.48 | 0.034 |

5° *Transmission de la chaleur à travers les murailles.* Ordinairement une des deux températures $t$ et $t'$ est inconnue; c'est ce qui arrive, par exemple, pour les murailles des édifices, lorsque, pour les différentes pièces, une seule face est exposée à l'air extérieur. La face intérieure opposée à celle exposée à l'air extérieur recevant le rayonne-

ment de toutes les autres, toutes les surfaces intérieures ont une température peu différente de celle de l'air des pièces qu'elles forment; mais la température de la surface extérieure est nécessairement plus grande que celle de l'air extérieur, et elle ne peut être déterminée à l'aide d'un thermomètre. Alors il faut transformer la formule (8) en y remplaçant $t'$ en fonction de la température de l'air extérieur. Mais comme en employant la formule (7) de Dulong l'élimination de $t'$ serait impossible, et qu'en admettant les formules (5) et (6) on serait conduit à une équation du deuxième degré assez compliquée et d'un usage difficile, M. Péclet a admis la loi de Newton, qui est suffisamment exacte pour des petits excès de température, et il a posé

$$M = (k + k')(t' - T'). \qquad (9)$$

$T'$ température de l'air extérieur.

Les équations (8) et (9) donnent

$$t' = \frac{Ct + (k + k')ET'}{C + (k + k')E} \quad \text{et} \quad M = \frac{C(k + k')(t - T')}{C + (k + k')E}. \qquad (10)$$

Si tous les murs sont exposés à l'air extérieur, comme dans les églises, par exemple, le rayonnement ne peut plus maintenir les faces intérieures à la température de l'air qu'elles renferment; alors il faut encore remplacer dans l'équation (10), $t$ en fonction de la température de l'air intérieur. Comme on peut poser

$$M = k'(T - t) \qquad (11)$$

T température de l'air intérieur.

Les formules (10) et (11) donnent

$$t = \frac{(k + k')(Ek'T + CT') + Ck'T}{C(2k' + k) + Ek'(k + k')} \quad \text{et} \quad M = \frac{k'C(k + k')(T - T')}{C(2k' + k) + Ek'(k + k')}. \qquad (12)$$

Cette nouvelle valeur de M est beaucoup plus petite que quand on suppose que les surfaces intérieures sont à la température de l'air intérieur, égalité que l'on ne peut admettre que quand une très-petite partie de muraille est exposée à l'air extérieur.

Pour des murs de 10 mètres de hauteur en pierre calcaire, pour lesquels $C = 1{,}70$; $k = 3{,}60$ et $k' = 1{,}96$, si $T = 15°$ et $T' = 7°$, les formules (12) deviennent

$$t = \frac{116{,}11 + 163{,}46E}{12{,}72 + 10{,}89E} \quad \text{et} \quad M = \frac{148{,}08}{12{,}72 + 10{,}89E},$$

et on a respectivement pour

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $E =$ | $0^m.10$ | $0^m.20$ | $0^m.30$ | $0^m.40$ | $0^m.50$ | $0^m.60$ | $0^m.70$ | $0^m.80$ | $0^m.90$ | $1^m.00$ |
| $t =$ | $9°.60$ | $9°.90$ | $10°.34$ | $10°.63$ | $10°.88$ | $11°.22$ | $11°.33$ | $11°.51$ | $11°.68$ | $11°.83$ |
| $M =$ | 10.7 | 9.9 | 9.2 | 8.6 | 8.1 | 7.6 | 7.2 | 6.9 | 6.6 | 6.3 |

La formule (10) donne respectivement

M= 33.42 26.86 22.92 19.24 16.84 15.03 13.48 12.25 11.30 10.39

6° *Transmission de la chaleur à travers les vitres.* 1° Si une seule face de la pièce est exposée à l'air, de manière qu'on puisse supposer la température $t$ des faces intérieures égale à celle T de l'air intérieur (5°), on a, en admettant que le réchauffement et le refroidissement s'effectuent de la même manière pour les mêmes excès de température,

$$(t-0)(k+k') = (0-T')(k+k');$$

d'où

$$0 = \frac{t+T'}{2} \quad \text{et} \quad M = \frac{t-T'}{2}(k+k'). \qquad (13)$$

0 température de la vitre.

2° Pour une enceinte entièrement vitrée chauffée par de l'air chaud et exposée de toute part à l'air extérieur, les faces intérieures n'étant chauffées que par le contact de l'air, puisque ayant toutes la même température, leur rayonnement réciproque ne change pas cette température, on a

$$k'(T-0) = (0-T')(k+k'), \quad \text{d'où} \quad 0 = \frac{k'T+(k+k')T'}{2k'+k},$$

et

$$M = k'(T-0) = (k+k')\frac{k'(T-T')}{2k'+k} \qquad (14)$$

A cause du rayonnement du sol, et des pertes de chaleur à travers les joints des vitres, pertes qui peuvent varier dans des limites très-étendues, M. Péclet pense que pour les serres et les constructions analogues, il y a lieu d'admettre les chiffres de transmission de la formule (15).

3° Pour un bâtiment en maçonnerie isolé de toutes parts, et dont les vitres n'occupent qu'une petite partie de la surface, comme pour les églises, la chaleur que les vitres reçoivent par rayonnement est $(t-0)(k_1-k)$, et celle qu'elles reçoivent par le contact de l'air est $k'(T-0)$. On a alors

$$(t-0)(k_1-k)+k'(T-0) = (0-T')(k'+k), \quad \text{d'où} \quad 0 = \frac{T'(k+k')+t(k_1-k)+Tk'}{2k'+k},$$

et

$$M = (0-T')(k+k') = \frac{(k_1-k)(t-T')+k'(T-T')}{2k'+k}(k+k'). \qquad (15)$$

$k_1$ coefficient du pouvoir rayonnant des murs (tableau de la page 425).
$k$ *id.* des vitres *id.*
$k'$ coefficient de la perte de chaleur due au contact des vitres avec l'air (2° page 426).

Pour $T=15°$; $T'=7°$; $k=2.91$; $k_1=3.60$; des murailles de 10 à 20 mètres de hauteur sur $0^m.50$ d'épaisseur, et d'une conductibilité $C=1.70$, la valeur de $t$ sera à peu près de 10°, et suivant que la hauteur des fenêtres est de :

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 mètres. |
|---|---|---|---|---|---|
| $k'$ = | 2.400 | 2.210 | 2.130 | 2.082 | 2.049 |
| M = | 14.64 | 13.79 | 13.24 | 13.21 | 13.06 |

La formule (13) donne respectivement :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| M = 21.20 | 20.48 | 20.16 | 19.97 | 19.83 |

7° *La quantité de chaleur perdue par le sol* est en général très-petite, comme l'expérience le prouve, et elle peut être négligée dans l'établissement des appareils de chauffage. Dans nos climats la température du sol étant à peu près constante à 8 mètres de profondeur, et égale à la température moyenne annuelle de 10 à 11°, il en résulte que la température du sol des édifices doit être bien voisine de cette dernière, qui diffère peu de celle intérieure habituelle de 15°.

8° Quant à l'*influence de la partie supérieure des pièces*, les édifices publics et les maisons particulières étant toujours recouverts d'une toiture et d'un plancher épais de grenier, il en résulte qu'on peut négliger la perte de chaleur par la partie supérieure des édifices.

9° *Transmission de la chaleur à travers les enveloppes cylindriques.* Ce cas est celui, par exemple, d'un tuyau métallique parcouru par de la vapeur et enveloppé d'une matière conduisant mal la chaleur. On a

$$M = \frac{2\pi R'C(k+k')(T-T')}{C+(k+k')R'N}.$$

M quantité de chaleur transmise par unité de longueur de tuyau et par heure;
$N = e(\log R' - \log R)$;
$e = \frac{1}{0,4342945} = 2,3026$ nombre par lequel il faut multiplier le logarithme d'un nombre pour avoir son logarithme népérien (*Int.*, 385);
R et R' rayons extérieurs du tuyau et de l'enveloppe;
T et T' températures intérieure et extérieure;
C coefficient de conductibilité de l'enveloppe [4°];
$k$ et $k'$ coefficients dus au rayonnement et au contact de l'air (1° et 2°); si la matière enveloppante est couverte de toile, $k=3.65$, et $k'$ se déduit de la formule donnée au 2° pour les cylindres horizontaux.

332. *Chauffage des appartements par les cheminées ordinaires.* La quantité de chaleur rayonnée dans l'appartement par un foyer ordinaire de cheminée est à peu près le 1/4 de la chaleur totale rayonnée

par le combustible; ainsi, pour le bois, elle est seulement les 0,06 ou 0,07 de la chaleur totale développée par sa combustion (282).

Les combustibles les plus convenables pour ce mode de chauffage sont la houille et le coke, dont les pouvoirs rayonnants sont très-grands (289 et 290). La cheminée ouverte n'utilise cependant qu'environ les 0,13 de la chaleur totale développée par ces combustibles.

On peut admettre que dans les cheminées ordinaires 1 kilog. de bois exige au moins l'appel de 100 mètres cubes d'air, et 60 mètres dans celles qui sont le mieux construites (291).

Le diamètre d'une cheminée ordinaire d'appartement varie de $0^m,20$ à $0^m,25$. Rarement il convient de dépasser cette limite, à moins que pour les appartements destinés à recevoir un grand nombre de personnes; dans ce cas, afin de faciliter la ventilation, on porte ordinairement la section des cheminées à 25 ou 27 décimètres carrés, $0^m,80$ sur $0^m,32$ environ.

Dans les cheminées à la Rumfort, l'ouverture inférieure du tuyau à fumée varie de $0^m,04$ à $0^m,06$ de section. Dans les cheminées à la L'Homond, la distance du tablier au contre-cœur est de $0^m.15$, et à une hauteur de $0^m,30$, le contre-cœur porte des briques qui ne laissent plus à l'ouverture que $0^m,05$ de largeur.

D'après des expériences faites par les membres du comité consultatif, les proportions de charbon nécessaires pour maintenir une même salle à la même température pendant le même temps, sont 100 pour les cheminées ordinaires, 13 pour les poêles métalliques, et de 13 à 16 pour les appareils analogues aux poêles, mais à foyers ouverts.

Dans le choix des différents modes de chauffage, il faut avoir égard, selon les circonstances, non-seulement à la chaleur utilisée, mais aussi à la ventilation produite.

333. *Chauffage par des poêles* (331). Lorsqu'un tuyau dans lequel circule de la fumée chauffe directement l'air extérieur, on peut admettre que la quantité de chaleur qui passe à travers ses parois est proportionnelle à la différence des températures intérieure et extérieure, et, des expériences de M. Péclet sur les cheminées en tôle, en fonte et en terre, il résulte que un mètre carré de surface laisse passer en une heure, pour une différence de température de un degré, 3,93 unités de chaleur pour la tôle, 9,9 unités pour la fonte, et 3,85 unités pour la terre cuite de $0^m,01$ d'épaisseur.

D'après cela, supposant que dans un poêle la fumée soit abandonnée à 200°, on peut même, avec de bonnes dispositions, l'amener jusqu'à 100° avant de la laisser s'échapper au dehors, sa température aux environs du foyer étant au moins de 800°, sa température moyenne est de 500° pendant la chauffe, et l'excès de température varie de 400° à 500°; d'où il résulte que, dans ce cas, chaque mètre carré de surface de chauffe laisse passer en une heure, pour un excès moyen

de 450°, 1768,5 unités de chaleur pour la tôle, 4455 pour la fonte, et 1732,5 pour la terre cuite de $0^m$,01 d'épaisseur.

Cette énorme différence des quantités de chaleur qui passent à travers la tôle et la fonte n'existe pas dans le chauffage par l'eau ou par la vapeur.

Les résultats précédents peuvent servir à calculer la surface de chauffe d'un poêle ou d'un calorifère, les tuyaux parcourus par la fumée ayant la section minimum de la cheminée (295), et le combustible produisant un effet utile égal aux 0,80 de sa puissance calorifique. Dans la pratique, on compte ordinairement sur un mètre carré de surface de chauffe en tôle ou en fonte, quoique pour cette dernière elle puisse être beaucoup moindre, par 100 mètres cubes de capacité de salle à chauffer.

Le diamètre des tuyaux de poêle peut se calculer comme celui des cheminées; mais il vaut mieux généralement s'en tenir aux dimensions $0^m$,10 à $0^m$,20 adoptées dans la pratique.

On donne un degré suffisant d'humidité à l'air, en plaçant un vase plein d'eau sur le poêle ou dans les conduits d'air chaud. La quantité d'eau est de 1 à 1,5 litre environ par jour pour une salle de 75 à 80 mètres cubes.

**334.** *Calorifères à air chaud.* L'air à échauffer doit toujours être pris à l'extérieur, et pour les calorifères placés dans les pièces qu'ils doivent chauffer et ventiler, tels que ceux que l'on emploie depuis quelque temps dans les écoles, il faut compter sur un mètre carré de surface de chauffe par kilogramme de houille ou par 2 kilogrammes de bois brûlés à l'heure, sans compter l'enveloppe extérieure.

Pour les calorifères non placés dans les pièces qu'ils doivent chauffer et ventiler, la quantité maximum de combustible à brûler se détermine en supposant que son effet utile est les 0,50 ou 0,55 de sa puissance calorifique (282); cet effet utile atteint les 0,75 et même les 0,80 pour les calorifères les mieux construits. La grille, pour une même quantité de combustible brûlée, a la même surface que pour les chaudières à vapeur (301), mais il vaut mieux augmenter cette surface que de la diminuer. La section de la cheminée et des canaux de circulation se calcule comme pour les chaudières à vapeur (295), en supposant égale à 200° la température de la fumée dans la cheminée. La surface de chauffe réelle est de 2 mètres carrés par kilog. de houille ou 2 kilog. de bois à brûler par heure.

La quantité d'eau à donner par jour pour entretenir l'humidité est de 1.5 à 2 litres pour une salle de 100 mètres cubes.

Les tuyaux qui conduisent l'air chaud dans les diverses pièces à chauffer doivent, autant que possible, partir tous du réservoir même d'air chaud, afin qu'ils ne se gênent pas mutuellement. Deux tuyaux branchés l'un sur l'autre ne doivent pas se servir d'obturateur; aussi

faut-il, dans ce cas, faire usage d'une culotte. Les dimensions des tuyaux doivent être grandes; la vitesse de l'air ne doit pas être supérieure à $0^m,50$ en moyenne, les coudes et les étranglements des clefs compensés.

Les bouches doivent être larges et maillées avec du fil de fer très-fin, à grandes mailles de $0^m,005$ au moins de côté. Les bouches à coulisses sont plus commodes pour régler l'ouverture que celles à charnières.

Sans un moyen d'évacuation de l'air de la salle, l'air chaud ne peut pas s'y introduire. L'appel peut se faire par la cheminée, quand il y en a une, ou par une cage d'escalier contigu, à l'aide d'une bouche grillagée de communication. Dans les salles à manger ou les antichambres, on peut placer au plafond ou près du plafond une bouche grillagée qui communique, par un tuyau de $0^m,15$ à $0^m,16$ de diamètre, avec un tuyau de tôle montant de 2 mètres dans la cheminée de la cuisine ou dans tout autre cheminée constamment chauffée.

Quand on chauffe plusieurs étages avec un seul calorifère, les étages supérieurs absorbent tout l'air sans rien laisser au rez-de-chaussée; on remédie à cet inconvénient à l'aide de coulisses ou en divisant par des cloisons le réservoir d'air chaud en autant de parties qu'il y a d'étages. Il convient, quand cela est possible, que le tuyau qui conduit l'air à chaque étage circule sous le plafond de l'étage inférieur; des bouches convenablement distribuées sur sa longueur amènent l'air dans la pièce en traversant le plancher. Cette disposition nous a parfaitement réussi dans une fabrique de papiers peints, où l'on avait à la fois à chauffer et sécher.

Pour pouvoir chauffer un rez-de-chaussée, le calorifère doit être établi dans une cave en contre-bas; sans cela l'air chaud se distribue mal dans la pièce, il n'y va même pas si l'on chauffe en même temps des étages supérieurs.

Lorsqu'on fait arriver l'air chaud dans une pièce telle qu'un amphithéâtre par un grand nombre d'orifices placés sous les bancs, la section de ces orifices doit être calculée de manière que la vitesse de l'air ne dépasse pas $0^m,20$ par seconde.

Il n'y a guère que dans les hôpitaux où il soit nécessaire de maintenir une température constante jour et nuit. On y parvient par une combustion continue dans les foyers, ou par des réservoirs d'eau qui accumulent de la chaleur développée le jour pour la dégager lentement la nuit. Mais, à moins que les murailles n'aient qu'une bien faible épaisseur, la chaleur qu'elles renferment est presque toujours suffisante pour rendre peu sensible la diminution de température pendant la nuit.

En général, quand les murailles sont d'une certaine épaisseur, les chauffages de nuit sont inutiles, et presque toujours un chauffage actif d'un petit nombre d'heures le matin peut réparer en grande partie la perte du régime qui a eu lieu pendant la nuit.

Quand les murailles n'ont qu'une faible épaisseur, comme dans cer-

taines usines, elles se refroidissent beaucoup pendant la nuit; mais on parvient encore facilement à les échauffer en allumant les foyers un certain nombre d'heures avant l'arrivée des ouvriers.

Lorsque les pièces ne sont employées que certains jours et à certaines heures, pour économiser le combustible, on ne maintient pas les murailles dans un état constant de température, on ne rétablit même pas l'équilibre au moment de les utiliser; on se contente, par un chauffage très-vif de quelques heures, d'échauffer partiellement les murailles, et de compenser leur faible température par un plus grand échauffement de l'air pendant l'occupation des pièces (331).

Les différentes parties des appareils de chauffage se construisent pour les jours les plus froids de l'hiver, et de manière que le matin, en un petit nombre d'heures, ils puissent amener l'air et les murs de la salle à la température qu'ils doivent avoir pendant le jour. Il est économique de disposer les appareils de manière que, pendant ce chauffage préliminaire, on puisse interrompre la ventilation; ainsi, le calorifère étant à air chaud, il convient de pouvoir faire aller successivement l'air de la salle au calorifère et du calorifère à la salle.

335. *Chauffage de l'air par la vapeur.* D'après des expériences de Tredgold, les quantités de vapeur condensées en une heure par mètre carré de surface d'un tuyau exposé à l'air libre à 15° sont, pour les tuyaux

| | |
|---|---|
| de fer blanc. . . . . | 1k.07 |
| de verre. . . . . | 1 .76 |
| de tôle neuve. . . . . | 1 .80 |
| de tôle rouillée. . . . . | 2 .10 |

D'après Clément, la température de l'air étant 25°, un mètre carré de surface condense en une heure les poids de vapeur consignés dans le tableau suivant. La dernière colonne donne, d'après la loi du n° 305, les poids de vapeur qui seraient condensés si la température de l'air était de 15°.

| DÉSIGNATION DES SURFACES. | CONDENSATION, la température de l'air étant de | |
|---|---|---|
| | 25° | 15°. |
| | k. | k. |
| Tuyau horizontal en fonte nue . . . . . | 1.60 | 1.81 |
| *Id.* *id.* noircie. . . . . | 1.50 | 1.70 |
| *Id.* en cuivre nu . . . . . | 1.30 | 1.47 |
| *Id.* *id.* noirci. . . . . | 1.50 | 1.70 |
| Tuyau vertical en cuivre noirci.. . . . . | 1.75 | 1.98 |

Dans les grands chauffages à vapeur, on peut compter sur 1k,80 de

vapeur condensée en une heure par mètre carré de surface pour la fonte, et sur $1^k$,75 pour le cuivre.

D'après M. Grouvelle, un mètre carré de surface de fonte, chauffé intérieurement par la vapeur, et par conséquent les 990 unités de chaleur transmises par $1^k$,80 de vapeur condensée, suffisent pour chauffer et entretenir à 15° une salle de proportions de murs et de fenêtres ordinaires, telle que bibliothèque, bureau, etc., de 66 à 70 mètres cubes de capacité, ou un atelier de 90 à 100 mètres cubes. Si l'atelier a besoin d'une haute température, on prend un mètre de surface de chauffe par 70 mètres de capacité. Pour la Bourse de Paris, on a compté sur 67 mètres, qui chauffent convenablement.

Le diamètre des tuyaux de condensation de la vapeur à basse pression varie de $0^m$,07 à $0^m$,20; $0^m$,11 est le diamètre convenable lorsque le générateur est de la force de 12 chevaux. Le tuyau qui amène la vapeur de la chaudière est beaucoup plus petit; en Angleterre, on fait ce tuyau en fer creux, et on lui donne de 3 à 5 centim. de diamètre; en France, on le fait généralement en cuivre.

Lorsque, par suite de circonstances indépendantes du chauffage, la pression dans le générateur est élevée, de 2 atmosphères et au-dessus, d'après M. Grouvelle, le diamètre intérieur du tuyau de condensation doit être égal à un minimum de $0^m$,035, augmenté de $0^m$,0015 par force de cheval du générateur employé. Ainsi, pour une force de 10 chevaux, c'est-à-dire pour 200 à 250 kilog. environ de vapeur à l'heure, le diamètre sera $0^m$,05.

Connaissant le volume en mètres cubes d'air froid à chauffer dans un certain temps, en le multipliant par le poids d'un mètre cube (44 et 262), on a le poids total d'air à chauffer; ce poids, multiplié par la capacité calorique de l'air (267) et par la différence des températures de l'air chaud et de l'air froid, donne la quantité de chaleur à fournir à l'air. Cette quantité de chaleur divisée par 550, chaleur latente de vaporisation (269), donne la quantité de vapeur condensée. On détermine la quantité de charbon à brûler (282), et par suite les dimensions de la grille (301), des conduits de fumée et de la cheminée (295).

Pour le chauffage des ateliers par la vapeur, les ingénieurs admettent que, pour des ateliers de 8 mètres de largeur sur 3 mètres de hauteur, et dont la surface des vitres est le 1/6 de la surface totale, un tuyau en fonte de $0^m$,40 de circonférence, parcourant seulement une fois la longueur de l'atelier, suffit pour y maintenir une température constante de 15° pendant les temps les plus froids. Cela fait une surface de chauffe de $0^{m.c.}$,40, qui peut transmettre 396 unités de chaleur en une heure, par mètre courant d'atelier.

D'après des observations de M. Péclet sur plusieurs chauffages à vapeur, et notamment sur un chauffage de grande fabrique, pour une différence maximum de 20° entre les températures intérieure et exté-

rieure, il faudrait calculer la puissance des appareils de chauffage en comptant sur 70 unités de chaleur à fournir en une heure par mètre carré de surface de muraille de $0^m,33$ à $0^m,35$ d'épaisseur, et sur 80 unités par mètre carré de surface de vitre (331).

336. *Calorifères à eau chaude et à basse pression.* Nous allons calculer les dimensions d'un tel calorifère destiné à émettre 36000 unités de chaleur en une heure ou 10 unités par seconde; la température de l'eau étant de 80° dans la chaudière et dans la colonne ascensionnelle, qui a 2 mètres de hauteur verticale; de 55° en moyenne dans le tuyau de chauffe, que l'on suppose avoir une pente totale de 2 mètres, uniforme sur tout son circuit, et enfin de 30° en rentrant dans la chaudière.

Chaque kilog. d'eau perdant 50 unités de chaleur dans sa circulation, le poids d'eau qui doit sortir de la chaudière en une seconde est $\frac{10}{50} = 0^k,2$, dont le volume moyen dans le tuyau est, en prenant 0,000 466 pour coefficient de la dilatation absolue de l'eau pour 1° (260),

$$0,2(1 + 0,000\,466 \times 55) = 0,2051 \text{ de litre.}$$

En admettant que la quantité de chaleur que laisse passer la surface de chauffe, à égalité de différences de températures, est à peu près la même que pour la vapeur (335), chaque mètre carré de surface de fonte laisse passer en une heure, pour la différence 40° entre la température 55° de l'eau et celle 15° de l'air, $1,80 \times 550\,\frac{40}{85} = 466$ unités de chaleur. La surface de chauffe nécessaire pour laisser passer les 36000 unités de chaleur est donc

$$\frac{36000}{466} = 77,25 \text{ mètres carrés.}$$

Le diamètre d'un tuyau de chauffe étant $0^m,09$, sa circonférence est $0^m,2826$ (*Int.*, 667), et, par suite, sa longueur sera $\frac{77,25}{0,2826} = 273$ mètres. Prenant 5 mètres pour les parties qui sont en dehors de la pièce à échauffer, et qui comprennent la colonne ascendante et les raccordements du tuyau de chauffe avec cette colonne et la chaudière, on a 278 mètres pour le développement total de la circulation.

La vitesse de circulation de l'eau dans les tuyaux est due à la différence des pressions produites par deux colonnes d'eau de 2 mètres de hauteur verticale, l'une à 55° en moyenne et l'autre à 80°, cette différence étant exprimée par une hauteur d'eau à 55°. Or, la première, c'est-à-dire la colonne descendante, presse, par décimètre carré de section, de $\frac{1}{1 + 0,000\,466 \times 55}\,20 = 19^k,50$, et la colonne ascendante,

de $\frac{1}{1+0,000466\times 80}\,20 = 19^{k},28$ ; par conséquent, la vitesse de circulation est due à une hauteur d'eau à 55° correspondant à $0^{k},22$. En eau froide, cette colonne serait $0^{m},022$ ; en eau à 55°, elle est

$$0,022(1+0,000466\times 55) = 0^{m},022\,56\,;$$

ce qui fait $0^{m},000\,081\,15$ par mètre courant de tuyau.

Consultant le tableau du n° 167, on voit que sous la charge $0^{m},000\,077\,21$, le diamètre $0^{m},09$ débite $0^{l},3181$ par seconde; ce diamètre est donc grandement suffisant pour l'application qui nous occupe. Il n'est cependant pas aussi exagéré qu'il paraît l'être; d'abord à cause des changements de direction des tuyaux, et ensuite parce que la résistance étant proportionnelle au carré de la vitesse, le tableau du n° 167 donne, dans ce cas, une résistance ou charge trop faible, en la donnant pour la vitesse moyenne dans la conduite.

Pour chauffer un atelier de 13 mètres de largeur sur $3^{m},25$ de hauteur, une seule allée d'un tuyau de $0^{m},16$ de diamètre sur toute la longueur de l'atelier paraît suffisante, la température de l'eau étant de 75 à 80° (335). En général, dans la pratique, l'eau étant à 80° et l'air à 15°, c'est-à-dire la différence étant de 65°, il convient de considérer $1^{mc},50$ à $1^{mc},75$ de surface de chauffe comme l'équivalent de 1 mètre carré à la vapeur, et de chauffer 35 à 40 mètres cubes de salle ou de maison d'habitation par mètre carré de fonte.

On suivrait une marche analogue pour chauffer une pièce quelconque à l'aide de l'eau de condensation d'une machine à vapeur; seulement, dans ce cas, on élèverait l'eau mécaniquement.

337. *Calorifères à eau chaude et à haute pression.* On distingue le système mis en pratique par M. Duvoir, et le système Perkins. Dans le premier, la pression est portée jusqu'à 5 atmosphères, et dans le second, elle atteint une limite beaucoup plus élevée.

Un procédé de M. Duvoir consiste à chauffer l'air extérieur en le faisant passer sur des tuyaux dans lesquels circule l'eau chaude; cette disposition, d'un heureux effet, est employée depuis longtemps en Angleterre. Une autre disposition de M. Duvoir, et qui forme la base de tous ses appareils, consiste dans un système de *poêles à eau*, placés dans les salles mêmes, et chauffés en les faisant traverser par une seule circulation d'eau dont ils font partie intégrante : l'eau passe d'un poêle à l'autre par l'intermédiaire d'un tuyau.

Le système Perkins est formé d'une seule circulation d'eau par un tuyau d'un petit diamètre ; ce qui le rend peut-être moins dangereux que celui de M. Duvoir, quoique la pression y soit beaucoup plus élevée.

Les tuyaux employés à la fabrication de ce dernier genre de calorifères sont en fer creux, et ont $0^{m},025$ de diamètre extérieur et $0^{m},012$ de diamètre intérieur. Ces tuyaux sont composés de bouts qui ont 4 mè-

tres de longueur et qui sont vissés entre eux. On les essaye à 200 atmosphères de pression ; mais, théoriquement, ils peuvent supporter une pression supérieure à 3000 atmosphères (177 ou 311).

Dans les calorifères construits en Angleterre, la température de l'eau à la partie supérieure du circuit varie de 150° à 200°, ce qui correspond à des pressions de 4,50 à 15 atmosphères (272) ; mais dans le foyer, les tubes atteignant quelquefois la température rouge, la pression y est beaucoup plus grande (258, 272).

Le développement total d'une circulation n'excède jamais 150 à 200 mètres ; si la surface de chauffe exige une plus grande longueur, on emploie plusieurs circulations, qui peuvent être chauffées par le même foyer.

En Angleterre, on compte sur 2 pieds de longueur de tuyau pour chauffer 100 pieds cubes de capacité ; ce qui revient à peu près, en prenant la moyenne entre $0^m,025$ et $0^m,012$ pour le diamètre de la surface de chauffe, à 1 mètre carré de surface de chauffe pour 80 mètres de capacité.

L'expérience prouve qu'il y a perte d'eau dans ces calorifères, et que, dans les grands appareils, il faut ajouter 1/2 litre d'eau tous les 8 ou 10 jours.

En France, M. Gandillot établit ces calorifères à 9 fr. le mètre courant de tube tout compris. Les tubes ont de $0^m,03$ à $0^m,04$ de diamètre ; ils sont formés de bouts réunis par des manchons à vis, et ils résistent très-bien à des pressions de 40 atmosphères et plus.

338. *Chauffage des liquides.* Lorsqu'on chauffe directement un liquide dans une chaudière à l'aide d'un foyer placé dessous, la surface de chauffe peut encore se calculer d'après la considération qu'un mètre carré de cette surface laisse passer la quantité de chaleur nécessaire pour vaporiser de 15 à 20 kil. d'eau en une heure (307) ; mais il convient de prendre un mètre carré de surface de chauffe pour 3 à 4 kilog. de houille ou 6 à 8 kilog. de bois à brûler par heure. Les différentes parties du fourneau se déterminent comme pour les chaudières à vapeur ordinaires (295 et 301).

*Chauffage des bains.* Supposons qu'il s'agisse de déterminer la quantité de charbon nécessaire pour chauffer l'eau dépensée pour 25 bains, l'eau froide étant à 5°.

Une baignoire contenant de 280 à 300 kilog. d'eau à 30°, la quantité de chaleur dépensée est, pour chauffer l'eau des 25 bains, $300 \times 25(30 - 5) = 187\,500$ unités, qui absorberont à peu près 31 kilog. de houille ; on peut utiliser 6 000 unités de chaleur par kilogramme de houille.

On ne chauffe qu'une partie de l'eau, et on l'élève à la température de 70° à 80° ; le poids d'eau à échauffer de 5° à 80° est alors, pour les 25 bains, $\frac{187\,500}{75} = 2500$ kilog.

339. *Chauffage des corps solides.* Dans les fours destinés à fondre la fonte, la quantité de chaleur utilisée, c'est-à-dire absorbée par le métal pour s'échauffer et se fondre, n'est que les 0,09 de la chaleur totale développée par le combustible. (0,5 kilog. de coke pour fondre 1 kilog. de fonte, lequel, projeté dans 20 kilog. d'eau, en élève la température de 14°. *Traité de la chaleur*, par M. Péclet.) M. Grouvelle évalue cette quantité de chaleur utilisée à 0,20 dans les fours de fusion de la fonte; à 0,05 dans les fours à puddler, ainsi que dans les fours à réchauffer les fers et les tôles, et à 0,02 dans les fours de verreries et dans ceux à cuire les poteries, les porcelaines, etc.

D'après des expériences de M. Ebelmen, la quantité de chaleur qu'emportent les gaz est les 0,62 de la puissance calorifique du combustible pour le haut fourneau de Clairval, marchant au charbon de bois, et les 0,67 pour celui d'Audincourt, marchant avec un mélange de bois et de charbon de bois. Cette perte est plus considerable pour les hauts fourneaux au coke; ainsi, on brûle de 140 à 220 kilog. de coke pour 100 kilog. de fonte dans ces derniers, au lieu de 100 à 160 kilog. de charbon que l'on brûle dans les premiers.

Dans les fours continus destinés à la fabrication de la chaux, on emploie 1 volume de houille ou 1 volume 1/2 de coke pour 4 volumes de pierre à chaux. Les petits fours donnent 12 hectolitres de chaux par jour et les plus grands de 90 à 100 hectolitres.

Lorsqu'on cuit le plâtre au moyen des gaz perdus dans la fabrication du coke (290), il conviendrait de faire arriver sur le gaz un courant d'air qui en opérerait la combustion, et au delà de la flamme, un second courant d'air qui amènerait les gaz résultant de la combustion à 200 ou 300°, attendu que la cuisson du plâtre s'opère à 100°. (Consulter la 5e partie.)

### VENTILATION.

340. *Air nécessaire à la respiration.* D'après les expériences de M. Dumas, un homme, par sa respiration, transforme en acide carbonique, par heure, tout l'oxygène contenu dans 90 litres d'air, et le volume d'air qu'il expire est de 333 litres, qui contiennent à peu près 0,04 d'acide carbonique.

341. *Air vicié par la transpiration.* Il résulte des expériences de Séguin et de M. Dumas, qu'un homme, par sa transpiration cutanée et pulmonaire, produit en une heure 37,5 grammes de vapeur d'eau, qui peuvent être dissous par $5^{mc},846$ d'air à 15° et déjà à moitié saturé (275). La quantité d'air que vicie un homme en une heure, par sa respiration et sa transpiration, est donc moyennement de $6^{mc},179$. M. Péclet, en introduisant 6 mètres cubes d'air par élève, dans une école située rue Neuve-Coquenard, et contenant ordinairement 200 élèves, a remarqué

que l'air intérieur n'avait jamais d'odeur. Les expériences de M. Leblanc, dans une salle contenant 180 élèves, confirment les résultats de M. Péclet. Une ventilation de 6 à 7 mètres cubes d'air en une heure, par individu, suffisait pour la salle des séances de la chambre des députés, qui contenait de 1000 à 1100 personnes.

Dans les appareils de chauffage et de ventilation d'édifices publics examinés aux nos 344 et suivants, on s'est basé sur des nombres plus grands que ceux qui précèdent.

342. *Air vicié par l'éclairage.* Dans la combustion des matières employées à l'éclairage, on peut admettre que l'air qui alimente la combustion n'est brûlé qu'au 1/3.

*TABLEAU des poids de quelques matières brûlées en une heure, des volumes d'air nécessaires à la combustion, et des quantités relatives de lumière produites.*

| DÉSIGNATION DES MATIÈRES. | POIDS brûlé. | VOLUME D'AIR brûlé au tiers. | LUMIÈRES relatives. |
|---|---|---|---|
| | gr. | m. c. | |
| Chandelles de six à la livre. . . . . | 11 | 0.322 | 11 |
| Bougie. . . . . | 11 | 0.322 | 14 |
| Lampes gros bec. . . . . | 42 | 1.266 | 100 |

Ce tableau permet de calculer la quantité d'air vicié par l'éclairage artificiel d'une pièce, et comme, d'après les nos 340 et 341, on a les quantités d'air viciées par la respiration et par la transpiration des personnes, il est donc facile de déterminer la quantité d'air à introduire dans une pièce contenant un nombre déterminé de personnes, et dont l'éclairage artificiel consomme un poids donné de bougie ou d'huile.

L'air vicié par la respiration et la transpiration est encore propre à l'alimentation du foyer de chauffage, qui, dans les appartements chauffés par le rayonnement du combustible, suffit généralement à l'appel de tout l'air nécessaire à la ventilation.

343. *Chaleur produite par la respiration.* D'après M. Dumas, la quantité de carbone brûlée en une heure par l'acte de la respiration d'un homme est de 10 grammes; la chaleur développée est donc de 71,7 unités (282, expériences de Dulong). Une partie de cette chaleur est employée à former les 37,5 grammes de vapeur fournis par la transpiration (341); le reste $71{,}7 - 0{,}037\,5 \times 650 = 47{,}3$ unités est employé à chauffer l'air environnant, et il joue un grand rôle dans le chauffage des lieux habités. En effet, pour porter de 0° à 20° les 6 mètres cubes d'air consommés en une heure par la respiration et la transpira-

tion d'un homme (340 et 341), il suffit de $\frac{6 \times 1.3 \times 20}{4} = 39$ unités de chaleur ($1^k$,3. poids du mètre cube d'air à 0° sous la pression $0^m$,76 (44); 4, rapport approché de la capacité calorifique de l'eau à celle de l'air (267), c'est-à-dire moins que l'excès 47,3 unités provenant de la respiration. De là, il résulte que s'il n'y avait pas de refroidissement par les parois d'une pièce habitée dont l'air aurait été préalablement porté à 20°, cette température resterait constante en y introduisant $\frac{6 \times 47,3}{39} = 7,28$ mètres cubes d'air à 0°, par personne et par heure.

La température du corps humain est de 37°; celle des oiseaux, de 43° à 44°; celle des mammifères, de 37° à 40°, et celle des poissons, de 14° à 25°.

### EXEMPLES D'ÉDIFICES PUBLICS CHAUFFÉS ET VENTILÉS.

344. *Chauffage et ventilation de la prison cellulaire Mazas et de celle de Provins.* Les nombres de ce numéro et des suivants, sur le chauffage et la ventilation, sont extraits du *Supplément à la seconde édition du Traité de la chaleur* de M. Péclet.

1° La commission chargée d'examiner les projets de chauffage et de ventilation de la prison cellulaire Mazas a adopté le projet de M. Grouvelle, basé sur le principe de la circulation de l'eau chaude, avec le secours de la vapeur comme moyen de transmission de la chaleur aux réservoirs alimentant la circulation de l'eau dans les tuyaux de chauffage, mais en apportant au projet les modifications suivantes :

1° Porter à 10 mètres cubes par heure le volume d'air à fournir à chaque cellule de 20 mètres cubes de capacité;
2° Élever à 15° la température constante des cellules;
3° Établir une double circulation d'eau chaude, et en sens contraire, dans le canal de chauffage, afin qu'en chaque point du circuit la température moyenne des tuyaux fût sensiblement constante;
4° Établir la ventilation des cellules par les tuyaux de descente des matières fécales.

La ventilation des 1200 cellules, divisées en 6 bâtiments d'un rez-de-chaussée et de 2 étages, est produite par une cheminée d'appel en briques, de $2^m$,15 de diamètre intérieur et de 29 mètres de hauteur, placée au centre des six bâtiments à cellules. La cheminée des trois générateurs est en tôle et placée au centre de la cheminée d'appel; son diamètre est de $0^m$,80.

La commission chargée de la réception des travaux de M. Grouvelle a nommé une sous-commission composée de MM. Péclet, Leblanc et Thauvin pour les expérimenter. Voici l'extrait des résultats obtenus :

1° Les expériences ont eu lieu du 14 février 1850 au 30 avril 1851, et ont fourni des résultats aussi réguliers que possible pour le chauffage des différents étages;

2° L'appel par la cheminée s'est élevé à 30 000 mètres cubes par heure; ce qui correspond à un renouvellement d'air de 25 mètres cubes par cellule, au lieu de 10 mètres cubes, limite inférieure exigée par le cahier des charges;

3° La température a été maintenue pendant l'hiver entre 13° et 16° dans tous les bâtiments occupés, corridors et cellules;

4° Pour un chauffage continu de 12 jours et 12 nuits, la température extérieure étant de 7°,5, et la vapeur venant se condenser dans les serpentins placés dans les réservoirs d'eau chaude étant maintenue entre 2 et 3 atmosphères, la température des cellules s'est élevée jusqu'à 19°,50 et 20°,72 au rez-de-chaussée, et jusqu'à 20°,94 et 23°,31 au premier étage. Les différences entre les températures d'un même étage proviennent de l'orientation des cellules;

5° Pendant l'hiver de 1849-50, dans des expériences faites dans les caves de ventilation, pour une consommation de 13k,50 de houille par heure dans le foyer d'appel, on a expulsé 14 800 mètres cubes d'air par heure, et pour une consommation de 22k,33 de houille dans le même temps, la ventilation s'est élevée à 24 700 et 30 900 mètres cubes. Pendant les plus grandes chaleurs de l'été 1850, pour 20 kilog. de houille la ventilation a varié de 22 900 à 25 000 mètres cubes;

6° Pendant l'hiver de 1850-51, dans des expériences de ventilation générale : 1° L'air expulsé s'est élevé à 29 200 mètres cubes pour 20 kilog. de houille brûlés par heure dans le foyer d'appel; 2° La fumée étant bien refroidie sous des plaques de fonte avant d'arriver à la cheminée des générateurs, cette cheminée a peu d'influence sur la ventilation générale; ainsi, après une interruption de chauffage de vingt-quatre heures, la ventilation de 29 200 n'a descendu qu'à 28 200; 3° La consommation du foyer d'appel ayant été réduite de 20 kil. à 15 kilog. par heure, la quantité d'air expulsée a été trouvée comprise entre 28 100 et 31 500 mètres cubes; cette faible diminution est due au peu d'influence de l'activité du foyer sur le tirage de la cheminée au delà d'une certaine limite.

7° Pendant l'hiver de 1850-51, pour les bâtiments dans lesquels les prises d'air étaient ouvertes sur le corridor, la consommation de houille pour le chauffage a été de 400 kilog. par bâtiment et par jour, pour obtenir une température moyenne intérieure de 15°,15, avec une température extérieure de 3°,89, c'est-à-dire pour un excès de 11°,25. Pour les bâtiments dont les prises d'air étaient extérieures, la consommation a été de 500 kilogrammes de houille pour obtenir une température moyenne intérieure moins élevée de près de 1 degré. Le chauffage de l'administration a exigé 150 kilog. de combustible par jour pour les mêmes circonstances atmosphériques.

Pendant les sept mois de chauffage, la température moyenne à Paris étant 6°,5, admettant 14° pour la température moyenne intérieure, c'est-à-dire excès de 7°,5, la consommation moyenne par bâtiment sera de 270 kilog. de houille, et 100 kilogr. pour l'administration. Ainsi, la dépense totale sera de $270 \times 6 + 100 = 1720$ kilog. par jour.

Quant à la ventilation, la dépense moyenne de combustible est de 350 kilog. par jour d'hiver, et de 400 kilog. par jour le reste de l'année; mais pour obtenir une ventilation de 30 000 mètres cubes par heure, la consommation de combustible est de 20 kilog. par heure en hiver et 25 kilog. en été.

Les murs ont 0m,60 d'épaisseur, et leur surface totale exposée au contact de l'air est à peu près de 13 000 mètres carrés, non compris

les surfaces des voûtes et du sol, qui transmettent peu de chaleur. La surface totale des vitres est de 2173 mètres carrés.

Admettant que M=15, pour la quantité de chaleur transmise par mètre carré de muraille et par heure (5° du n° 331), et M = 22 pour la transmission des vitres dans les mêmes circonstances; la perte totale de chaleur par les vitres et les murailles sera $15 \times 13000 + 22 \times 2173 = 242\,806$ unités.

Pour élever 30000 mètres cubes d'air de 7°,5 à 14°, température à laquelle il sort des cellules, il faut $1{,}3 \times 6{,}5 \times 0{,}25 \times 30\,000 = 63\,375$ unités de chaleur.

La chaleur produite par les 1200 détenus est $40 \times 1200 = 48\,000$ unités.

La chaleur que doit fournir le calorifère est alors $242\,806 + 63\,375 - 48\,000 = 258\,181$. Chaque kilogramme de houille produisant un effet utile de 3750 unités, on brûlera par heure $68^{k},85$ de houille, et par jour $68{,}85 \times 24 = 1\,652^{k},4$, au lieu de 1620 kil. qu'a donné l'expérience.

2° La prison cellulaire de Provins a la même disposition que la prison Mazas, mais elle ne contient qu'un bâtiment et 39 cellules seulement. Les appareils de chauffage ont aussi été établis par M. Grouvelle, et d'après la disposition de la prison Mazas, si ce n'est que la chaudière chauffe directement l'eau chaude de circulation, et c'est la chaleur de la fumée de la chaudière qui produit la ventilation en hiver; en été, un foyer spécial d'appel produit la ventilation.

La cheminée du calorifère a $0^{m},31$ de diamètre, et elle s'élève de 5 mètres dans la cheminée d'appel, qui a 18 mètres de hauteur, $1^{m},06$ de diamètre à la base et $0^{m},60$ au sommet.

Les murailles ont $0^{m},60$ d'épaisseur moyenne et 1059 mètres carrés de surface. La surface des vitres est de $107^{m},50$.

Dans des expériences faites du 15 mars au 6 avril par M. Gentilhomme, la température moyenne pendant le jour étant de 6° et les nuits très-froides, la température moyenne de la journée a été de 14°,95 dans les cellules, de 15°,16 dans la galerie donnant entrée aux cellules, et de 18° dans le greffe. La température moyenne a été de 1° plus élevée dans les cellules exposées au midi que dans celles exposées au nord.

Le chauffage était toujours suspendu pendant la nuit, et cependant l'abaissement de température n'a jamais dépassé 0°,31; ce qui doit être attribué à la grande quantité de chaleur contenue dans les murailles et dans l'eau chaude.

Des expériences de ventilation opérées sur les tuyaux de descente de quelques cellules ont fourni les volumes d'air expulsés de chaque cellule, par heure, consignés dans le tableau suivant :

| FOYER DE LA CHAUDIÈRE en plein feu, et le foyer d'appel éteint. | | FOYER DE LA CHAUDIÈRE éteint depuis 12 heures, et le foyer d'appel éteint. | | FOYER DE LA CHAUDIÈRE éteint, et le foyer d'appel allumé. | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | m. | | m. | | | m. |
| Rez-de-chaussée. | » | Rez-de-chaussée. | 32.4 | Rez-de-chaussée. | Côté du nord. | 64.8 |
| 1er étage. . . . . | 59.4 | 1er étage. . . . . | 28.8 | | *id.* midi. | 43.4 |
| 2e étage. . . . . | 84.0 | 2e étage. . . . . | 16.0 | 1er étage. | *id.* nord. | 97.2 |
| | | | | | *id.* midi. | 72.7 |
| Moyenne. . . . . | 70 | Moyenne. . . . . | 25.7 | 2e étage. | *id.* nord. | 95.7 |
| | | | | | *id.* midi. | 80.0 |
| | | | | Moyenne. . . . . | | 75.6 |

Pendant que les expériences précédentes sur les tuyaux de descente s'exécutaient, on a aussi opéré directement sur la cheminée d'appel, et on a trouvé que les volumes totaux d'air écoulés en une heure par cette cheminée étaient respectivement dans la première, la deuxième et la troisième condition du tableau précédent, 3400, 1051 et 2940 mètres cubes; ce qui fait par cellule 87, 27 et 75,4 mètres cubes.

Le chauffage a lieu avec de la tourbe, dont la consommation moyenne journalière est de 367 kilog., équivalant à environ 175 kilog. de houille. La consommation moyenne du foyer d'appel n'a pas été observée.

**345.** L'appareil de chauffage de l'église Saint-Roch a aussi été établi par M. Grouvelle. Il consiste en une circulation d'eau chaude à basse pression placée dans des caniveaux situés sous le sol; l'air extérieur est appelé dans ces caniveaux, d'où il sort échauffé pour se répandre dans l'église.

Dans un caveau circulaire, qui règne sous le pourtour de la chapelle de la Vierge, est placée une chaudière ordinaire à deux bouilleurs, d'une puissance de 12 chevaux environ. Un tuyau de fonte, de $0^m,14$ de diamètre, dont les bouts sont réunis par des joints à boulons, et d'un développement de 168 mètres, part du sommet de la chaudière et passe sous le bas côté droit de l'église, en s'élevant par une pente d'environ $0^m,03$ par mètre; son point culminant est sous l'orgue; il revient par le côté gauche de l'église en suivant la même pente, et finit par aboutir à l'un des bouilleurs de la chaudière. Un petit tuyau additionnel, placé après coup, circule en sens contraire du tuyau principal, parallèlement au tuyau de retour, et finit par déboucher dans ce tuyau à son point culminant, c'est-à-dire sous l'orgue.

Les tuyaux circulent dans un canal dont chaque paroi verticale est formée de deux murailles en briques légèrement espacées, afin de diminuer le refroidissement. Le fond est formé de planches, dans lesquelles sont pratiquées les ouvertures d'admission de l'air froid; c'est dans le plafond du canal que sont pratiquées les prises d'air chaud, qui vien-

nent déboucher dans le sol de l'église. Après chaque bouche de chaleur se trouve une cloison transversale en bois qui ferme complétement le canal, et immédiatement après se trouve une arrivée d'air froid, qui, par cette disposition, est échauffé par toute la longueur de tuyau comprise entre deux bouches de chaleur.

Un système analogue au précédent, mais dont le tuyau n'a que $0^m,12$ de diamètre et 86 mètres de longueur, part de l'autre extrémité de la chaudière et circule sous la chapelle de la Vierge et le calvaire.

Des valves placées sous les tuyaux de départ et d'arrivée permettent de modifier ou même de supprimer la circulation dans chacune des grandes artères. Sur le pourtour de l'artère principale, 4 renflements de 3 mètres de longueur et de $0^m,35$ de diamètre augmentent encore la surface de chauffe; 4 autres renflements, en forme de poêles de différents diamètres, sont placés à l'orifice des bouches principales, et des petits embranchements sans retour favorisent encore le tirage des bouches qui ne sont pas directement placées sur le parcours.

Le tuyau de fumée a $0^m,35$ de diamètre; il est en tôle, et sur une longueur de 7 mètres il chauffe l'air qui alimente une bouche isolée de la chapelle de la Vierge.

| | |
|---|---|
| Surface de chauffe, y compris les bouilleurs. . . . . | $15^m,40$ |
| Surface de la grille. . . . . | $0^m,40$ |
| Surface de refroidissement de la circulation. . . . . | $164^m,85$ |
| Volume de l'eau qui s'échauffe. . . . . | $3^m,008$ |
| *Id.* qui se refroidit. . . . . | $4^m,218$ |
| Température de l'eau dans la chaudière. . . . . | 120° |
| *Id.* à sa rentrée dans la chaudière. . | 102° |
| Température moyenne de l'eau en circulation. . . . | 111° |
| Différence maximum de niveau. . . . . | 3 à $4^m$ |
| Nombre de bouches grillées versant l'air dans l'église. | 22 |
| Surface libre de chacune de 21 de ces bouches. . . . | $0^m,135$ |
| *Id.* de la bouche placée sous l'orgue. . . . | $0^m,400$ |
| *Id.* de toutes les bouches. . . . . | $3^m,235$ |
| Longueur de l'église. . . . . | 110 à $115^m$ |
| Largeur. . . . . | $28^m$ |
| Hauteur moyenne. . . . . | 15 à $18^m$ |
| Superficie, environ. . . . . | $3150^m$ |
| Volume, environ. . . . . | $32000^m$ |
| Surface des murailles exposées au refroidissement. . | $5835^m$ |
| Épaisseur moyenne de ces murailles. . . . . | $0^m.50$ |
| Surface des vitraux. . . . . | $860^m$ |
| Volume des murs et piliers intérieurs. . . . . | $1800^m$ |
| Nombre des places assises. . . . . | 3500 |
| Nombre des personnes réunies les dimanches ordinaires. . . . . | 2000 à 4000 |
| Nombre des personnes réunies les fêtes ordinaires. . | 4000 à 6000 |
| *Id.* grandes fêtes. . . | 6000 à 8000 |
| Surface totale des ouvertures pratiquées dans la voûte et des fissures des fenêtres. . . . . | $14^m.15$ |

| | |
|---|---|
| Hauteur moyenne à laquelle se trouvent toutes ces ouvertures et fissures. . . . . | 11m,20 |
| Nombre des portes donnant à l'extérieur. . . . . | 6 |

Des expériences de M. Pottier ont fait voir que le maximum de puissance de l'appareil était limité à maintenir la température intérieure à 16° au-dessus de la température extérieure; ce qui est suffisant dans les plus grands froids.

Après un chauffage continu de 10 jours, on a amené la température intérieure à 16°, et même à 18° pendant les offices du dimanche, la température extérieure étant de 4 à 5°. Une fois que toute la masse de l'église a été échauffée, on a pu ne chauffer que quelques heures par jour, ou mieux, on a pu attendre que la température intérieure se fût abaissée de 2 à 3°, et alors chauffer le temps suffisant pour la ramener à son point de départ; cette dernière marche paraît être plus économique sous le point de vue du combustible. Des expériences, il résulte que la température extérieure étant 5°, et celle intérieure 12°, il faudrait interrompre le chauffage pendant 5 à 6 jours pour obtenir un abaissement de 1° seulement.

Des thermomètres placés à 8 ou 9 mètres du sol, sous l'orgue, et d'autres à 18 ou 20 mètres, à la corniche du dôme de la chapelle de la Vierge, n'ont, pendant 20 jours, indiqué une température supérieure à la moyenne de 10 thermomètres placés à 2 mètres du sol que de 0°,25 à 0°,75 au maximum.

Contre toutes les surfaces intérieures des murailles, et jusqu'à une assez grande distance, la température de l'air est constamment inférieure de 0°,75 à 1°,50 à celle de l'air dans la partie centrale.

Du 17 novembre au 18 janvier, c'est-à-dire en 63 jours, comprenant les 10 jours de feu continu, on a brûlé 32 170 kilog. de houille, ce qui fait une moyenne de 510 kilog. par jour. Pendant ce temps, la température moyenne intérieure a été de 13 ou 14°, et celle extérieure 5 ou 6°.

La perte de chaleur par les murailles, pour l'excès de température de 16°, qui correspond au maximum d'effet de l'appareil, et en prenant le coefficient de conductibilité $C = 1,27$, est $M = 14,80$ par mètre carré et par heure (5° du n° 331), et pour la totalité des murs par heure $14,80 \times 5835 = 86\,358$ unités.

La hauteur des fenêtres étant de 4 mètres, pour un excès de température de 16°, $M = 40$ unités (formule (15) du n° 331); la perte totale de chaleur par les vitraux est alors de $40 \times 860 = 34\,400$ unités par heure.

La perte totale de chaleur par les murailles et les vitres est donc de $86\,358 + 34\,400 = 120\,758$ unités.

Admettant que les 40 kilog. de houille brûlés par heure produisent un effet utile de $3850 \times 40 = 154\,000$ unités de chaleur, la perte de chaleur par la ventilation est donc de $154\,000 - 120\,758 = 33\,242$.

**346.** Le grand amphithéâtre du Conservatoire des arts et métiers est

chauffé et ventilé d'après un dispositif de M. Léon Duvoir-Leblanc. Aux termes du marché, la température ne doit pas être inférieure à 15°, et elle s'élève habituellement à 20° pour les grandes réunions de 800 personnes.

Pour obtenir la même température au bas et au sommet de l'amphithéâtre, et extraire, sans gêner les auditeurs, une quantité d'air suffisante pour enlever toute émanation, M. Duvoir a ouvert, vers le bas des gradins, sous les jambes des auditeurs, des orifices d'appel qui sont en communication avec des conduits pratiqués sous les gradins. Ces orifices sont au nombre de 39, dont 34 ont $0^m,08$ sur $0^m,20$, et sont répartis sur les 2/3 de la hauteur de l'amphithéâtre, et dont les 5 autres sont situés sous le premier gradin et ont $0^m,15$ sur $0^m,60$ d'ouverture. Tous les conduits se réunissent dans une pièce située sous l'amphithéâtre et qui contient le calorifère à eau chaude. Dans cette pièce, et à $0^m,50$ au-dessus du sol, s'ouvrent 4 bouches d'appel prolongées par autant de conduits verticaux qui se réunissent en un seul tuyau horizontal communiquant à une grande cheminée d'appel, au bas de laquelle se trouve un foyer qu'on n'allume qu'en cas de besoin.

Des tuyaux de circulation d'eau chaude, avec des parties renflées, appelées bouteilles, passent dans le fond du conduit horizontal pour en échauffer l'air et produire l'aspiration.

La cheminée verticale contient deux tuyaux en fonte, l'un qui communique au fourneau d'une machine à vapeur, et l'autre toujours chaud qui sert de commencement de cheminée au calorifère.

Ces deux tuyaux sont raccordés avec deux autres plus petits qui forment la cheminée du petit calorifère auxiliaire employé pour déterminer ou accélérer au besoin l'appel d'air.

Il a encore été établi dans le plafond de l'amphithéâtre, au-dessus de la partie la plus élevée des gradins, une large bouche d'appel qui communique directement à la cheminée d'appel par un tuyau horizontal.

La somme des sections des 4 orifices qui font appel dans la chambre du foyer, augmentée de la section $0^{mc},49$ de l'orifice pratiqué dans le plafond de l'amphithéâtre est de $1^{mc},653$.

La section de la cheminée prise à hauteur du regard est $1^m,10 \times 1^m,03 = 1^{mc},133$. Si l'on en déduit la section $0^{mc},187$ des tuyaux en fonte, il reste pour le passage libre $0^{mc},946$.

Des expériences faites par M. Morin, et qui ont duré 9 jours, pendant lesquels les températures moyennes intérieure et extérieure ont été environ de 19° et de 6°, on a constaté :

1° Que par suite de l'effet de la circulation de l'air et de l'appel plus considérable par le bas que par le haut, la différence des températures de la partie supérieure et du bas n'a jamais dépassé 1°.5 sur 20°, qui était la température maximum ;

2° Que pour les ventilations actives, le volume d'air enlevé a été en moyenne de $45^m.23$ par chacune des 800 personnes et par heure, et pour les moins actives $10^m.0$. A

ce dernier chiffre, aucune odeur désagréable ne se faisait sentir, mais cependant on doit prendre celui de 15 à 16$^{m}$ pour base des projets de ventilation des salles occupées par des personnes en bonne santé ; pour des malades et surtout des blessés il est loin d'être suffisant.

Par des expériences spéciales faites à l'hospice Beaujon, M. Morin a constaté que la quantité d'air évacué variait de 40 à 60 mètres cubes par malade et par heure, et qu'elle était à peine suffisante quand il n'y avait pas de blessures trop graves. Si l'air était bien distribué dans les salles, il est évident que ces quantités d'air seraient plus que suffisantes (348);

3° Que le foyer d'appel n'a généralement été entretenu que faiblement ; l'échauffement de la cheminée par le simple tuyau de chauffage et celui des conduits horizontaux par les bouteilles pleines d'eau chaude ont paru suffisants ;

4° Que la quantité totale de charbon brûlée par jour pour le chauffage et la ventilation a varié de 180 à 225 kilog. par jour, soit 200 kilog. par jour.

**347.** *Chauffage et ventilation de la salle des séances de l'Institut.* Note lue par M. Cheronnet à la séance de l'Institut du 6 mai 1852, et publiée dans la *Revue de l'instruction publique*.

« La salle des séances de l'Institut est chauffée et ventilée d'après les procédés de M. Duvoir-Leblanc. Le chauffage est produit par 4 poêles remplis d'eau chaude, à travers lesquels circule un courant d'air qui s'échauffe. Ces appareils, situés aux 4 coins de la salle, peuvent fonctionner ensemble ou séparément, suivant la température de l'air extérieur, au moyen de robinets de communication spéciale entre chacun d'eux et le générateur.

» La ventilation se fait par deux grands conduits qui communiquent, l'un avec une série de grilles situées devant les pieds même des membres de l'Institut, l'autre avec un grand nombre de trous faits dans les gradins qui règnent sur les longs côtés de la salle. Le premier de ces tuyaux descend jusqu'au rez-de-chaussée, pour remonter ensuite dans une cheminée, dans laquelle est un réservoir à eau chaude de 12 mètres de hauteur qui produit l'appel. Le second tuyau ne descend que jusqu'à l'entre-sol, et remonte ensuite dans la cheminée. Un troisième conduit, destiné à la ventilation d'été, part de la partie supérieure de la salle et se rend dans la cheminée.

» Le 5 avril, une expérience a été faite dans le but de constater la quantité d'air extraite de la salle des séances : cette expérience a été exécutée au moyen de deux anémomètres qui ont été placés simultanément dans les deux conduits, et y sont restés une heure chacun. Voici les résultats de cette expérience :

» 1$^{er}$ orifice (rez-de-chaussée), section 0$^{m}$,970, vitesse de l'air 0$^{m}$,938 par seconde, volume écoulé en une heure 3 275$^{m}$,496. 2$^{e}$ orifice, section 0$^{m}$,3842, vitesse 1$^{m}$,284, volume écoulé en une heure 1 795$^{m}$,916. Ainsi, pendant cette première expérience, il a été extrait de la salle des séances 5 071 mètres cubes d'air. La salle renfermait 180 personnes, ce qui donne, par heure et par personne, 28$^{m}$,20. Le temps était très-beau, et la température était de 12 à 13°.

» Le 19 avril, une seconde expérience a été faite dans les mêmes conditions; elle a donné, pour le premier conduit, 4 022$^{m}$,784; pour le second, 1 908$^{m}$,372; total, 5 931. Il y avait 200 personnes dans la salle; le volume d'air extrait a donc été de 29$^{m}$,65 par heure et par personne. Ce jour-là le temps était très-couvert; il est même tombé de la neige pendant l'expérience; la température extérieure s'est élevée à 7°,5 environ. »

348. *Chauffage et assainissement de l'hôpital Lariboisière.*

L'hôpital se compose d'une cour carrée de 115 mètres environ de longueur sur 45 mètres de largeur, environnée de portiques. Perpendiculairement aux longs côtés, à égales distances les uns des autres et aux extrémités, se trouvent six pavillons isolés, à deux étages. A chaque étage de chacun de ces bâtiments et au rez-de-chaussée se trouve une salle renfermant 32 lits, et une plus petite qui n'en contient que 2; ainsi le nombre des lits de chaque bâtiment est de 102, et le nombre total 612. Dans la direction des petits côtés de la cour intérieure, se trouvent des bâtiments qui se prolongent jusqu'à la distance des extrémités des pavillons; enfin, derrière un des petits côtés de la cour intérieure, et dans l'alignement des grands côtés, se trouvent encore d'autres constructions; ces bâtiments sont destinés aux différents services de l'établissement. Tous sont environnés par un mur d'enceinte.

Un projet de M. Duvoir-Leblanc a été adopté pour une moitié de l'établissement, et un autre de MM. Thomas, Laurens et Grouvelle pour l'autre moitié.

Le projet de M. Duvoir consiste à placer dans la cave de chaque pavillon un calorifère à eau chaude, dont l'eau alimente un certain nombre de poêles placés dans les salles. L'air pris au niveau du sol s'échauffe en passant autour des tuyaux de communication de l'eau chaude et à travers les poêles, entre dans les salles, et s'échappe ensuite par des conduits verticaux qui le conduisent dans le grenier; là, il est dirigé par des canaux horizontaux, renfermant des tuyaux à eau chaude, dans une cheminée ayant 5 mètres de hauteur.

Le projet de MM. Thomas, Laurens et Grouvelle consiste en une chaudière à vapeur placée dans une cave située sous une des cours de service, qui était destinée à la chaudière à vapeur des bains; une haute cheminée en briques, placée à côté, opère le tirage du foyer. La vapeur, formée sous une pression de 4 à 5 atmosphères et détendue dans une machine de manière à conserver une pression de une atmosphère et demie, est conduite en face de chaque pavillon par un tuyau en fonte placé au centre d'un caniveau creusé dans les galeries souterraines qui font le tour de la cour intérieure de l'hôpital; ce tuyau est enveloppé de corps mauvais conducteurs qui réduisent à fort peu de chose la chaleur perdue. Il passe dans son trajet à côté des bains, et fournit, par un court branchement, la vapeur qu'ils exigent. Un petit tuyau branché

sur la conduite générale, en face de chaque pavillon, y conduit la vapeur nécessaire au chauffage; les corridors et les chambres des sœurs sont chauffés par des bouches de chaleur qui reçoivent l'air chauffé par les colonnes montantes de vapeur et de retour d'eau. La cage de l'escalier, le chauffoir et les salles de malades renferment des poêles à eau chauffés par la vapeur. Les tuyaux de conduite de vapeur dans les salles sont placés dans un caniveau situé au-dessous du parquet et recouverts d'une plaque de fonte. Les étuves des offices sont entretenues chaudes par la circulation d'un petit filet de vapeur dans le bain-marie dont elles se composent. L'eau pour les bains est chauffée dans un réservoir en tôle placé au grenier, à l'aide d'un serpentin dans lequel circule la vapeur.

La machine à vapeur, dans laquelle se détend la vapeur qui est ensuite employée au chauffage, fait mouvoir un ventilateur qui aspire de l'air recueilli au sommet du clocher de la chapelle, et le refoule dans des tuyaux en tôle qui le portent à chacun des pavillons et à chacun des chauffoirs. Dans l'épaisseur du mur de tête de chaque pavillon existe une cheminée qui reçoit l'air insufflé et permet de le distribuer aux divers étages. Sous le plancher de chaque salle, et contre le caniveau qui contient les tuyaux à vapeur et de retour d'eau, se trouve une galerie en maçonnerie partant de la cheminée; l'air forcé circule dans cette galerie, d'où, par un certain nombre d'orifices ménagés à sa paroi, il se répand autour des tuyaux à vapeur et y prend une température de 20 à 30°; alors il entre dans la salle par des ouvertures pratiquées dans la plaque de fonte qui recouvre le caniveau. Les sections de ces ouvertures sont telles, que l'air qui en sort ne possède qu'une faible vitesse.

Des cheminées aboutissant au grenier, au nombre de 9, et creusées dans chaque mur latéral des salles, sont destinées à évacuer l'air vicié; chacune d'elles porte à cet effet deux orifices d'entrée munies de registres; l'un, placé au niveau du sol, sert pour l'hiver; l'autre, à $2^m,50$, ne s'ouvre que l'été. Les cheminées d'évacuation débouchent dans les greniers, et l'air vicié qu'elles amènent se dégage par 4 châssis à tabatière, et par une cheminée centrale en tôle placée au centre du grenier. Cette disposition ne permet pas d'utiliser les greniers; mais si l'on voulait s'en servir, il faudrait conduire l'air des cheminées partielles à la cheminée centrale par des canaux.

L'état hygrométrique de l'air dans les salles est maintenu à 1/2 par une injection de vapeur dans les tuyaux de conduite.

La quantité d'air insufflé peut varier de 20 à 40 mètres cubes par lit et par heure.

L'air sort du ventilateur avec un excès de pression de $0^m,04$ d'eau.

Il y a une machine à vapeur, une chaudière et un ventilateur de rechange.

La vapeur sortant de la chaudière, ou de la machine où elle a été détendue, suffit à tous les services : chauffage, ventilation, bains, buanderie, élévation d'eau.

Pendant un hiver rigoureux, on a constaté que les salles, parfaitement ventilées, conservaient une température de 15 à 16°.

349. *Chauffage et ventilation des ateliers de taillerie et de cristallerie de Baccarat*, par MM. Thomas et Laurens. Extrait d'une note de ces ingénieurs rapportée par M. Péclet.

Dans ce magnifique établissement, les ateliers consacrés à la taille des cristaux se composent d'un corps de bâtiment de 150 mètres de longueur, qui, à une de ses extrémités, se prolonge par une aile en retour d'équerre ayant même hauteur et même largeur que lui, et une longueur de 45 mètres ; toutes les dispositions ont donc dû être prises comme s'il se fût agi d'un seul corps de bâtiment de 200 mètres de longueur. Le rez-de-chaussée et le premier étage sont occupés par deux files de tours à tailler les cristaux, mis en mouvement par deux turbines d'une force collective de 60 chevaux. Ces ateliers contiennent constamment 544 ouvriers.

Le taillage se faisant à l'eau, l'atmosphère est constamment saturée ; ce qui exige une ventilation active et un chauffage plus dispendieux.

Les travaux de ventilation et de chauffage ont été établis en même temps et combinés ensemble. Le chauffage s'effectue à l'aide de la vapeur à haute pression, 4 atmosphères et 5 au besoin pendant les plus grands froids, et la ventilation à l'aide de deux ventilateurs à force centrifuge. Un des ventilateurs, mis en mouvement par la turbine n° 1, est placé dans le grenier, et il refoule dans les salles de travail de l'air pur puisé à la hauteur des toits ; une conduite générale de vent, en planches de sapin bien jointives, est établie sur le plancher du grenier, et des tuyaux, aussi en bois, descendent de distance en distance pour porter l'air neuf aux diverses salles. En hiver, cet air est préalablement échauffé à la température d'environ 30°, par son passage dans une chambre que traverse un faisceau de 15 tuyaux de vapeur ayant $0^m,135$ de diamètre et 2 mètres de longueur.

Les orifices d'arrivée de l'air neuf sont placés dans l'axe des salles, à 10 mètres environ les uns des autres, et à 1 mètre au-dessus du plancher.

Les salles n'ayant que $8^m,30$ de largeur, l'air se trouve suffisamment bien réparti.

L'air vicié s'échappe des salles sans aucune cheminée d'appel, simplement par les joints des fenêtres que l'on a soin de ménager à cet effet. On ne ressent aucun courant incommode.

Le second ventilateur est appliqué à la turbine n° 2, et il fait le service de l'autre moitié des ateliers.

Les ventilateurs ont $1^m,20$ de diamètre et une largeur de $0^m,28$ ;

ils font 300 tours par minute ; la pression du vent dans les répartiteurs qui aboutissent aux ventouses n'est que de 3 à 4 millimètres d'*alcool*.

Le volume de vent insufflé s'élève à environ 12 mètres cubes par ouvrier et par heure, ce qui est suffisant à cause de la bonne répartition de l'air dans l'atelier.

Le chauffage est produit par de simples tuyaux de vapeur en fonte qui circulent sous les établis des ouvriers ; ils enlèvent ainsi l'humidité plus spécialement accumulée dans ces établis, et permettent aux ouvriers d'avoir les pieds chauds.

L'expérience a prouvé qu'avec la ventilation indiquée, il est indispensable, soit d'émettre de la chaleur dans les ateliers, soit, de préférence, d'élever la température de l'air insufflé, à des époques de l'année et à des heures de la journée pour lesquelles la température extérieure semblerait devoir rendre tout chauffage inutile. On explique ce fait, qui est une cause d'excès de dépense, par l'efficacité de la ventilation, jointe à l'humidité répandue dans les ateliers. Si l'air neuf n'arrive pas dans les salles à une température d'au moins 22 à 25°, il occasionne une sensation désagréable, ou plutôt les salles se refroidissent rapidement; d'où résulte la nécessité de chauffer l'air de ventilation la majeure partie de l'année, si ce n'est toute la journée, au moins le matin.

## ÉCLAIRAGE.

**350.** *Propriétés physiques de la lumière.* La radiation de la lumière est rectiligne, et la vitesse de ses rayons est de 70000 lieues par seconde. Pour une même source, l'intensité de la lumière diminue dans le rapport inverse des surfaces des sections du cône de lumière, c'est-à-dire en raison inverse du carré de la distance.

**351.** *Matières employées à l'éclairage.* Il en est qui sont solides, d'autres qui sont liquides, et d'autres gazeuses.

Les matières solides appliquées à l'éclairage sont : 1° les branches de bois résineux, employées dans quelques contrées peu civilisées ; 2° les chandelles, qui se fabriquent avec le suif provenant du bœuf, du bouc, du mouton ; 3° les bougies proprement dites, qui se font avec la cire d'abeilles, et celles fabriquées avec le blanc de baleine et les acides margarique et stéarique.

*TABLEAU de la quantité de chandelle et de différentes bougies consommée par heure et en grammes, et de la clarté relative, celle de la bougie de cire de 8 au kilogramme étant représentée par 100.*

| DÉSIGNATION DES MATIÈRES BRULÉES. | | CONSOMPTION par heure, en grammes. | CLARTÉ relative. |
|---|---|---|---|
| | | g. | |
| Chandelles de suif, | de 6 au 1/2 kilog. . . . | 9,53 | 81 |
| Bougies stéariques, | 4 *id.* . . . . . | 10,63 | 98 |
| *Id.* | 5 *id.* . . . . . | 10,16 | 92 |
| *Id.* | 6 *id.* . . . . . | 9,84 | 89 |
| *Id.* | 8 *id.* . . . . . | 9,22 | 82 |
| Bougies de cire, | 4 *id.* . . . . . | 9,37 | 100 |
| *Id.* | 6 *id.* . . . . . | 8,59 | 92 |
| *Id.* | 8 *id.* . . . . . | 7,66 | 83 |
| Bougies de blanc de baleine, | 4 *id.* . . . . . | 10,31 | 118 |
| *Id.* | 5 *id.* . . . . . | 9,22 | 100 |
| *Id.* | 6 *id.* . . . . . | 8,53 | 96 |

En divisant les nombres de la troisième colonne par ceux de la deuxième, on a les quantités relatives de lumière produites par le même poids des diverses matières; on trouve ainsi que le pouvoir éclairant de la cire étant 100, les pouvoirs moyens du suif, de l'acide stéarique et du blanc de baleine sont respectivement 80, 84 et 104.

Les huiles, grasses, siccatives et essentielles, sont les liquides employés à l'éclairage. Les huiles grasses sont les seules que la pratique ait généralement adoptées; les huiles siccatives ne peuvent être employées à cause de leur durcissement à l'air, et les huiles volatiles ne brûlent qu'avec fumée et dégagent une odeur fort désagréable. Parmi les huiles grasses, les plus généralement employées sont celles d'olive, de colza, de navette et d'œillette ou pavot.

Le gaz utilisé pour l'éclairage s'extrait de la houille, des résines, des acides gras de toute nature, et de presque toutes les matières organiques, puisqu'elles donnent par la distillation des carbures d'hydrogène gazeux, principe essentiel du gaz de l'éclairage.

**332.** *Éclairage par le gaz.* La flamme du gaz de l'éclairage est d'autant plus brillante que la densité du gaz est plus grande, que l'hydrogène contient plus de carbone, que le nombre des particules de carbone est plus grand, et que la température de l'air d'alimentation et par suite celle de la flamme sont plus élevées. Le pouvoir éclairant du gaz de la houille est moindre que celui du gaz de l'huile; dans une série d'expériences, la densité du gaz de la houille étant 0,529 en moyenne, et celle du gaz à l'huile 0,960, le pouvoir éclairant du premier étant 100, celui du second a été 272.

L'éclairage d'un bec de lampe Carcel consommant 42 grammes d'huile

épurée à l'heure se paye, pour un éclairage journalier de 5 heures, 134f,47 par an, y compris l'entretien et le nettoyage de la lampe, qui coûtent, par abonnement, 18 fr. par an, et les mèches, dont la consommation est de 1 fr. 50 c. par an. Pour le même temps d'éclairage journalier par le gaz à l'huile, on paye 108 fr. par an pour un bec, et par le gaz à la houille, 93f,60. La lumière dans ce dernier cas étant à celle de la lampe Carcel dans le rapport de 1,40 à 1, la lumière annuelle d'une lampe Carcel, produite avec du gaz à la houille, ne coûterait donc que 66f,85.

Le gaz provenant de la distillation de l'huile a pour densité 1,054 au moment de sa préparation, et suivant qu'on le consomme à cet instant, ou deux ou quatre jours après, il faut brûler par heure 506 ou 544 ou 607 centimètres cubes pour obtenir la lumière d'une chandelle de 6 au 1/2 kilog. Pour le gaz de la houille, ces nombres sont respectivement 1012, 1087 et 1164 centimètres cubes.

On donne ordinairement aux becs la forme des becs d'Argant. Le tuyau, à l'extrémité, s'évase et prend la forme d'un anneau dans lequel on soude une couronne métallique percée de trous circulaires dont le diamètre varie de 1/4 à 1/2 millimètre, par lesquels le gaz s'échappe. Le verre de ces becs a environ 0m,06 de diamètre sur 0m,15 à 0m,18 de hauteur. Comme le montre le tableau suivant, déduit de l'expérience, le nombre de trous reconnu le plus avantageux est 20; ces trous sont espacés de 3 millimètres.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Nombre de trous. . . . . | 8 | 10 | 15 | 20 | 25 |
| Lumière. . . . . | 360 | 360 | 391 | 409 | 382 |
| Dépense. . . . . | 367 | 318 | 296 | 289 | 375 |
| Intensité relative . . . . . | 98 | 118 | 132 | 141 | 139 |

Les becs dits chauve-souris ou en éventails sont formés d'une sphère creuse en acier, de 6 millimètres de diamètre, réunie à un pas de vis par une petite gorge. Dans cette sphère, on pratique à la scie une fente de 1/6 de millimètre environ de largeur, par laquelle s'échappe le gaz. Ils sont vissés dans un petit tube en cuivre soudé à la conduite.

Il y a dans l'enceinte de la capitale 6 compagnies gazières. Elles ont sous les rues de Paris 446 kilomètres de conduites en fonte, en tôle bituminée et en plomb. Les services publics leur prennent 13 910 becs, consumant 14 470 mètres de gaz par jour. Les services particuliers en consomment 42 000 mètres cubes par jour.

Aujourd'hui, les compagnies gazières de la capitale sont réunies en une seule société. Un décret impérial, en date du 25 juillet 1855, approuve le traité conclu le 23 juillet 1855, entre la ville et la société, pour la concession de l'éclairage et du chauffage au gaz dans Paris.

Nous allons donner un extrait du cahier des charges (*Moniteur* des 26 et 27 décembre 1855).

La ville de Paris concède à la société le droit exclusif de conserver et d'établir des tuyaux pour la conduite du gaz d'éclairage et de chauffage sous les voies publiques.

Cette concession est faite pour 50 années, qui commenceront le 1er janvier 1856.

L'administration aura le droit d'autoriser des essais d'éclairage et de chauffage par tous les systèmes qui pourront se produire, dans une limite de 1000 mètres de longueur par chaque essai, et sans que l'exercice de ce droit puisse donner lieu à aucune indemnité en faveur des concessionnaires. Cette Société ne pourra être constituée à un capital en actions supérieur à 50 000 000 de francs. Au delà de 10 pour 100 de ce capital, les bénéfices qu'elle réalisera seront partagés entre elle et la ville par moitié, après l'expiration des 16 premières années de la concession.

La Société remplacera par une ou plusieurs usines, qui seront construites en dehors des murs d'enceinte, les trois usines situées aujourd'hui dans l'intérieur de Paris. Ces nouvelles usines devront fonctionner le 1er janvier 1860 au plus tard.

*Dispositions communes à l'éclairage public et particulier.*

L'éclairage sera fait par le gaz extrait de la houille. Il ne pourra être employé d'autre gaz sans le consentement formel et par écrit du préfet de police, après délibération du conseil municipal.

Le gaz sera parfaitement épuré; son pouvoir éclairant devra être tel que, sous une pression ordinaire, il donne, pour les becs de l'éclairage public, les intensités de lumière ci-après :

1re *série*, consommant 100 litres à l'heure, 0,77 de l'éclat d'une lampe Carcel brûlant 42 grammes d'huile à l'heure;

2e *série*, consommant 140 litres à l'heure, 1,10 de l'éclat d'une lampe Carcel brûlant 42 grammes d'huile à l'heure;

3e *série*, consommant 200 litres à l'heure, 1,72 de l'éclat d'une lampe Carcel brûlant 42 grammes d'huile à l'heure.

Si, par suite du progrès de la science, l'administration, de l'avis du conseil municipal, jugeait convenable d'imposer à la Société l'emploi de procédés étrangers au système actuel de fabrication du gaz, celle-ci serait tenue de se conformer aux prescriptions de l'administration.

Dans le cas où l'emploi de ces nouveaux procédés aurait pour résultat un abaissement notable dans le prix de revient du gaz, la Société serait obligée de faire profiter l'éclairage public et particulier de cet abaissement de prix, dans les proportions déterminées par l'autorité administrative, toujours de l'avis du conseil municipal.

Il en serait de même pour le cas où, sans attendre l'intervention administrative, la Société aurait pris l'initiative de l'application de procédés nouveaux.

Ces stipulations ne seront applicables que par périodes de cinq ans.

Dans les derniers mois de chaque période, tous les procédés étrangers au système actuel de fabrication, qui seraient jugés de nature à constituer un progrès, seront examinés par une commission qui sera désignée par le ministre de l'intérieur, et qui indiquera ceux des perfectionnements ou celles des inventions qui lui paraîtront pouvoir recevoir une application industrielle et manufacturière.

En cas de découverte d'un mode d'éclairage autre que l'éclairage par le gaz, l'administration se réserve le droit de concéder toute autorisation nécessaire pour l'établissement du nouveau système d'éclairage sans être tenue à aucune indemnité envers la société actuelle.

Pendant la durée de l'éclairage et pendant toute la durée du jour, dans les quartiers où l'état de la canalisation et le nombre des consommateurs le permettront, le gaz devra être tenu, dans les conduites, sous une pression assez forte pour qu'il arrive aux becs en quantité suffisante, même dans le cas où il aurait à traverser un compteur.

*Éclairage public.*

Cet éclairage comprend toutes les voies publiques existantes, et celles qui pourront être créées, ainsi que tous les établissements municipaux et départementaux dans la ville de Paris. Il comprendra les établissements militaires qui seront indiqués par le préfet de police.

Il y aura 3 séries de becs.

La dimension de la flamme de ces becs sera au minimum, savoir :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Pour la | 1re | série | 0m,057 | de largeur sur | 0m,029 | de hauteur. |
| — | 2e | — | 0m,067 | — | 0m,032 | — |
| — | 3e | — | 0m,094 | — | 0m,045 | — |

Le prix est fixé par heure :

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Pour les becs de la | 1re | série à. . | 0f,015 |
| — — | 2e | — à. . | 0f,021 |
| — — | 3e | — à. . | 0f,030 |

Lorsque le gaz sera livré au compteur, il sera payé à raison de 0f,15 le mètre cube.

Les modèles des brûleurs employés seront déterminés par le préfet de police.

L'éclairage public est divisé en éclairage permanent et en éclairage variable.

L'éclairage permanent fonctionne du soir au matin sans interruption.

L'éclairage variable est subordonné aux besoins des localités.

La nature de l'éclairage sera fixée par le préfet de police, qui aura toujours le droit de la modifier.

*Éclairage particulier.*

La Société sera tenue de fournir le gaz à toute personne qui aura contracté un abonnement de trois mois au moins, et qui se sera d'ailleurs conformée aux dispositions des règlements concernant la pose des appareils.

Les polices en vertu desquelles seront souscrits les abonnements devront être conformes à un modèle approuvé par l'administration.

Les abonnements pourront être faits pour tous les jours sans exception ou en excep-tant les dimanches et fêtes.

Aucun abonnement ne pourra être refusé, mais la Société sera en droit d'exiger que le payement s'en fasse par mois et d'avance.

Le gaz sera fourni, soit au compteur, soit au bec et à l'heure, à la volonté des abonnés.

Un modèle de chaque système de compteur, approuvé par l'administration, sera déposé à la préfecture de police.

Les compteurs seront à la charge des abonnés, qui auront la faculté de les prendre parmi les systèmes autorisés, et de les faire poser et entretenir par des ouvriers de leur choix, sauf les droits des fabricants brevetés.

Ils ne pourront être mis en service qu'après avoir été vérifiés et poinçonnés par l'administration.

Ils seront soumis, quant à leur exactitude et à la régularité de leur marche, à toutes les vérifications que l'administration pourra prescrire, sans préjudice de celles que les abonnés ou la Société voudraient faire effectuer par les voies du droit

Les abonnés au compteur auront la libre disposition du gaz qui aura passé par le compteur ; ils pourront distribuer le gaz comme bon leur semblera, soit à l'intérieur, soit à l'extérieur de leur domicile, sans que, dans le cas où le nombre de becs déclarés serait augmenté, il puisse en résulter aucune action contre la Société, à raison de la faiblesse de l'éclairage.

Le prix du mètre cube de gaz vendu au compteur est fixé à 0f,30 pour les 50 années de la concession.

La Société devra faire jouir ses abonnés de ce prix à partir du 1er janvier 1856,

nonobstant toute police antérieure que ceux-ci auraient pu consentir à des prix supérieurs.

Elle sera tenue de fournir, en location, des compteurs d'un système de son choix à tous ceux de ses abonnés qui lui en demanderont.

Le prix de cette location sera déterminé par le préfet de police, et indiqué sur la police d'abonnement.

Les prix de vente du gaz livré à l'heure au moyen de becs cylindriques, à double courant d'air, dits d'*Argant*, seront débattus de gré à gré entre la Société et les abonnés.

La Société devra, pour tous les consommateurs qui le demanderont, convertir immédiatement les abonnements à l'heure en abonnements au compteur.

Pendant toute la durée de la concession, le prix de tout autre bec que celui qui est déterminé dans l'article précédent, ou d'un éclairage qui aurait lieu hors des heures de service, sera débattu de gré à gré entre la Société et les abonnés.

Il en sera de même pour les becs cylindriques, percés de vingt trous qui seraient placés à l'extérieur.

Les abonnés ne pourront exiger d'éclairage, soit au compteur, soit au bec, que pendant le temps où les conduites de la Société seront en charge pour le service ordinaire; les conditions des livraisons de gaz qui devraient avoir lieu en dehors de ce temps seront réglées de gré à gré entre la Société et ses abonnés, sauf le cas prévu par l'article 13.

*Chauffage.*

En ce qui concerne l'application du gaz au chauffage, la Société se conformera à toutes les dispositions qui lui seront prescrites par l'administration municipale, sans toutefois que celle-ci puisse lui imposer des prix autres que ceux qui sont fixés pour le gaz d'éclairage.

*Annexe au traité.*

A l'expiration de la concession, la ville de Paris deviendra propriétaire de plein droit, et entrera en possession, sans indemnité, des tuyaux, robinets, siphons, regards, valves et autres accessoires qui existeront alors sous les voies publiques.

Elle deviendra également propriétaire des usines, moyennant un prix fixé à dire d'experts.

*Cornues.* Les cornues servant à la distillation de la houille doivent être en très-bonne fonte grise, ni trop grise, ni trop blanche, afin qu'elles ne soient ni trop perméables au gaz ni trop cassantes. En les coulant debout, on obtient plus de régularité et d'homogénéité. Elles ont $0^m,035$ d'épaisseur, et on leur donne aujourd'hui les plus grandes dimensions possibles : leur longueur varie de $2^m,30$ à $2^m,60$; intérieurement, leur largeur ordinaire est $0^m,45$ et leur hauteur $0^m,35$ à $0^m,40$. Quelquefois, on ne place qu'une cornue dans un four, d'autres fois 3, le plus souvent 5, et dans ces derniers temps, on a construit des fours à 7 et même 9 cornues. Si les cornues en terre réfractaire ne sont pas généralement employées, c'est qu'il faut une terre d'une excellente qualité, et des hommes habiles pour les exécuter. A Paris, on en fait un usage presque exclusif, et on y trouve de l'économie, due au moindre refroidissement au moment de la charge, et surtout à leur durée, qui dépasse quelquefois deux ans, au lieu que les cornues en fonte ne servent que neuf mois en moyenne; cependant les cornues en

terre sont plus sujettes à des fêlures et à des ruptures instantanées que celles en fonte. Pour les petites usines, on donne souvent la préférence aux cornues en fonte, à cause des inconvénients graves résultant de la casse des cornues en terre.

Pendant les premiers jours, les cornues en terre, qui sont poreuses, laissent passer une certaine quantité de gaz; mais bientôt le carbone ferme les pores de la terre.

*Houille* (289). Pendant la distillation, le volume de la houille augmente quelquefois des 2/5 de son volume primitif; aussi a-t-on soin de charger un volume de houille qui n'est guère que la moitié de la capacité de la cornue. La température de la cornue pendant la distillation doit être constante et au degré du rouge cerise sans dépasser le rouge blanc (258). La distillation d'une charge dure 4 heures 15 minutes pour le charbon de Mons et de Commentry; elle dure de 5 à 6 heures pour d'autres; ainsi, celui des mines de Buisson (Belgique) ne peut être distillé en moins de 6 heures. Les ouvriers exercés déchargent et rechargent une cornue en 2 ou 3 minutes.

Dans un four à 5 cornues d'une bonne construction, on peut distiller 2500 à 2600 kilogr. de houille en 24 heures, et le feu étant bien conduit, on brûle de 12 à 14 hectolitres de coke, c'est-à-dire de 30 à 35 pour 100 du coke produit.

M. Gibon rapporte que des fours à 5 cornues, qu'il a établis à l'usine d'Arras, distillaient 7 hectolitres de houille grasse du poids de 80 kilog. par chaque charge de 6 heures, et dépensaient pendant le même temps 2,50 hectolitres combles de coke, du poids de 45 kilog. l'hectolitre.

*TABLEAU des dépenses de coke pour la distillation d'un hectolitre de houille de 80 kilogrammes, obtenues dans une usine de Paris.*

| | hect. | kilog. |
|---|---|---|
| Four à 1 cornue. . . . . | 0.75 | 34.50 |
| Four à 2 cornues, adossé. . . . . | 0.55 | 23.10 |
| Four à 5 cornues, non adossé. . . . . | 0.54 | 22.75 |
| Four à 5 cornues, adossé. . . . . | 0.45 | 18.90 |

En général, la distillation de 100 kilog. de houille exige 25 à 30 kilog. de coke.

Afin que les grilles ne soient pas détruites trop rapidement, par suite de la température très-élevée, on a imaginé de maintenir une nappe d'eau dans le cendrier.

La houille qui convient le mieux pour les usines à gaz est celle qu'on désigne en Angleterre sous le nom de canel-coal; sa composition est de 74,47 de charbon, 5,42 d'hydrogène, 19,61 d'oxygène et 0,50 de cendres; elle donne 320 litres de gaz par kilog. En Angleterre, 1 hectolitre du poids de 80 kilog. produit en moyenne 22 mètres cubes de

gaz; en France, les charbons de Mons, très-propres à la distillation, en produisent 20 mètres cubes; le charbon de Commentry, employé depuis quelque temps à Paris, donne plus de gaz que celui de Mons, mais d'un pouvoir éclairant plus faible.

D'après une expérience de M. Penot, à Mulhouse, 1 kilog. de houille, suivant qu'il était sec ou contenait 10 pour 100 d'eau, a donné respectivement 240 litres de gaz de bonne qualité et 92 de mauvaise, et 160 litres de bonne qualité et 92 de mauvaise. La houille doit donc être sèche.

En 1854, une commission nommée par l'empereur, et composée de MM. Regnault, Chevreul, Morin et Péligot, a été chargée de suivre la marche d'une usine à gaz d'essai établie à Sèvres, et de déterminer les principaux éléments du prix de revient du gaz à la houille. Voici les résultats moyens obtenus pour 100 kilog. de houille, les fours étant parfaitement construits et marchant à l'air chaud :

| | |
|---|---|
| Coke tout venant. . . . . | 75,45 kilog. |
| Goudron. . . . . | 6,73 |
| Eaux ammoniacales. . . . . | 7,34 |
| Gaz. . . . . | 22,94 mèt. cubes. |
| Coke tout venant consommé. . . . | 20,43 kilog. |

D'après ces chiffres, qu'il serait bien difficile de réaliser dans l'industrie, le prix de revient d'un mètre cube de gaz, pour l'élément charbon, peut alors s'établir ainsi :

| | | | |
|---|---|---|---|
| *Consommation :* | 100 kilog. de houille. . . . . | | 2f.400 |
| *Produit :* | 55k,02 de coke tout venant à 3 fr. les 100 kilog. . | 1f,650 | 2f.022 |
| | 6k,73 de goudron à 5 fr. les 100 kilog. . . . . | 0f,336 | |
| | 7k,30 d'eaux ammoniacales à 0f,50 les 100 kilog. . | 0f,036 | |
| Prise des 22m,94 de gaz. . . . . | | | 0f.378 |
| Prix du mètre cube. . . . . | | | 0f.0165 |

En comptant la houille à 2f,50 les 100 kilog., le prix du mètre cube de gaz devient 0f,0208, et le prix de vente du gaz rendu au bec est :

| | |
|---|---|
| Élément charbon, compris une augmentation de 15 p. 100 à cause des fuites. | 0f,02392 |
| Frais divers. . . . . | 0f,08150 |
| Impôt et octroi. . . . . | 0f,02800 |
| Intérêt. . . . . | 0f,04950 |
| Total. . . . . | 0f,18292 |

*Condenseur.* Le gaz, en sortant de la cornue, passe par un tube ascendant, appelé *buse montante,* de 0m,12 à 0m,15 de diamètre, pour se rendre dans un cylindre horizontal de 0m,40 de diamètre, placé en avant et au-dessus du fourneau. Ce cylindre, appelé *barillet*, contient, jusqu'à un niveau déterminé, de l'eau dans laquelle la buse montante en se recourbant plonge de quelques centimètres. Le barillet est garni d'un dégorgeoir qui y maintient un niveau constant, en donnant écoulement au goudron et à l'eau ammoniacale.

En sortant du barillet, le gaz passe dans un tuyau en fonte plongé dans l'eau, où se condense la vapeur entraînée par le gaz. Le condenseur étant constamment rafraîchi par un filet d'eau froide, on calcule sa surface sur ce que 30 décimètres carrés suffisent pour condenser par minute la vapeur contenue dans 3 décimètres cubes de gaz; ainsi, un four monté de cinq cornues chargées chacune de 68 kilog., dont la production en cinq heures serait de 90 mètres cubes, ou 300 décimètres cubes par minute, exigerait un condenseur de 30 mètres carrés de surface.

Pour éviter la solidification des sels ammoniacaux dans un tube trop long, le condenseur est souvent composé d'une série de tuyaux disposés en jeu d'orgue, et quelquefois ces tuyaux sont boulonnés sur des caisses en fonte, dans lesquelles se rendent les produits de la condensation. Ces caisses sont munies de siphons qui y maintiennent le liquide à un niveau constant; des diaphragmes plongeants obligent le gaz à suivre la série de tuyaux. Quelquefois la caisse est remplacée par un barillet à siphon. Les tubes plongent dans le liquide, et une tubulure permet au gaz de passer d'un tuyau dans le suivant Des regards, convenablement disposés, permettent de nettoyer facilement l'appareil.

*Épurateur.* Du condenseur, le gaz passe dans l'épurateur, caisse, ordinairement en fonte, portant à sa partie supérieure et sur tout son contour extérieur une rigole contenant de l'eau dans laquelle plonge le bord du couvercle de la caisse, de manière à obtenir une fermeture hydraulique. Une cloison verticale, également en fonte, qui s'élève du fond jusqu'à une petite distance du couvercle, divise la caisse en deux parties égales. A des distances verticales égales, on place dans chaque compartiment de la caisse trois claies en fer ou en osier, et quelquefois des plaques de tôles percées de trous. Ces claies sont soutenues par des tasseaux fixés aux parois de la caisse et de la cloison de division, et elles supportent chacune une couche de chaux éteinte pulvérulente, que le gaz est obligé de traverser, et où il se débarrasse de l'hydrogène sulfuré qu'il contient. On fait arriver le gaz près du fond d'un des compartiments de la caisse, et il se dégage près du fond de l'autre, après avoir traversé six couches de chaux.

A Lille, Marseille, Arras, Bordeaux, etc., on a adopté un système méthodique qui consiste en quatre caisses semblables à celle qui vient d'être définie. Le gaz traverse toujours trois caisses pendant que l'on charge la quatrième, et on a soin de faire d'abord passer le gaz dans la première chargée, puis la deuxième et la troisième. Par ce moyen, on obtient facilement un gaz d'une pureté convenable pour la consommation, et avec 1 hectolitre de chaux vive, on peut épurer 600 mètres cubes de gaz.

*Laveur.* Dans quelques usines, le gaz, en quittant le condenseur et avant de se rendre à l'épurateur, passe dans trois laveurs, générale-

ment en fonte, où il laisse les sels ammoniacaux et l'ammoniaque qu'il renferme encore. Comme l'eau ne peut enlever la totalité de ces sels, M. Mallet a fait breveter un procédé qui consiste à substituer à l'eau pure l'emploi du chlorure de manganèse, qui est un résidu encombrant provenant de la fabrication du chlore et des chlorures décolorants. On a soin de diviser le gaz par bulles; il suffit que la pression soit de 2 à 3 centimètres pour opérer l'absorption; des agitateurs empêchent les dépôts de se former.

La dissolution s'extrait du premier laveur, dans lequel on fait passer le liquide du deuxième; celui-ci reçoit le liquide du troisième que l'on charge d'une dissolution pure : par là, l'épuration est méthodique. Ce procédé rend très-propre le gaz au traitement par la chaux : ainsi, un hectolitre de chaux suffit, en employant le système méthodique à quatre caisses, pour épurer 1400 à 1500 mètres cubes de gaz.

A défaut de chlorure de manganèse, on peut employer le sulfate de fer de basse qualité, qui ne coûte que 8 fr. les 100 kilog. à Paris, et même 5 à 6 fr. s'il n'est pas cristallisé. L'idée d'employer l'acide sulfurique étendu, pour priver le gaz de son ammoniac, est oubliée aujourd'hui.

Quand le procédé de M. Mallet n'est pas usité, ce qui a généralement lieu, le gaz sortant des épurateurs à chaux passe dans une caisse entourée d'une autre concentrique ayant même fond. Le gaz arrive dans la première caisse et passe dans la seconde en traversant des fentes horizontales faites dans les parois de la première. Comme on maintient de l'eau à un niveau supérieur à ces fentes, le gaz, pour passer dans la caisse extérieure, est obligé de traverser cette eau, où il laisse en grande partie son ammoniaque. Des petites hottes, placées à la sortie des fentes, divisent le gaz.

Depuis quelque temps, M. Mallet épure le gaz complétement en une seule opération, en plaçant sur les claies de l'épurateur un mélange humide de sulfate et d'oxyde de plomb, mélange qui se révivifie presque indéfiniment, après sa transformation sur les claies en sulfate d'ammoniaque et en sulfure de plomb. Enfin, à cause de la difficulté de se procurer du sulfate de plomb, MM. Laming et Mallet viennent de remplacer le mélange précédent par un autre composé de sciure de bois et d'oxyde de fer hydraté, qu'ils placent sur les claies au lieu de chaux, et qui absorbe l'hydrogène sulfuré après que le gaz a été privé de son ammoniaque dans le laveur.

*Gazomètre.* Quand le gaz est épuré, il se rend au gazomètre, dont la capacité dépend de la quantité de gaz qui doit se consommer dans un temps donné. Si, pour l'éclairage d'une ville, il faut 4000 mètres cubes de gaz en 10 heures, par exemple, et que les cornues soient chargées six fois en 24 heures, chaque charge devra produire 667 mètres cubes de gaz, et le gazomètre devra contenir quatre charges, soit 2661 mètres

cubes. $h$ étant la hauteur du gazomètre et $d$ son diamètre, comme pour la solidité il convient de faire $d = 2h$, on aura donc, dans le cas qui nous occupe,

$$h = \sqrt[3]{\frac{2661}{\pi}} = 9^{m},50, \text{ et par suite } d = 19 \text{ mètres.}$$

Ordinairement, la hauteur $h$ s'augmente de $0^{m},30$ à $0^{m},60$. Les gazomètres des villes de province ont ordinairement de 15 à 20 mètres de diamètre ; les plus grands de la capitale ont de 30 à 35 mètres.

Quelle que soit la dépense de gaz d'une usine, elle doit avoir au moins deux gazomètres, afin de pouvoir suffire à l'éclairage en cas d'accident ou de réparation.

*Conduites.* La pression strictement nécessaire pour une bonne alimentation des becs est de $0^{m},010$ d'eau, et il convient qu'elle soit de $0^{m},014$ à $0^{m},016$. Il est à peu près impossible que cette pression se conserve uniforme sur toute la longueur de la conduite : 1° à cause du frottement du gaz dans la conduite ; 2° à cause de la variation du débit sur toute la longueur de la conduite, due à la répartition et à l'allumage des becs, ainsi qu'aux fuites ; 3° enfin, à cause de la différence de niveau des différents points de la conduite, d'où naît une variation de pression due à ce que la densité du gaz est moindre que celle de l'air.

Une hauteur d'air de 1 mètre correspondant à une pression d'eau de $0^{m},0012$, la densité du gaz étant à peu près de 0,55, une hauteur de 1 mètre de gaz correspond à une pression d'eau de $0,0012 \times 0,55 = 0,00066$. Il en résulte que si la conduite va en descendant à partir de l'usine la pression du gaz, en outre de celle nécessaire à l'écoulement, sera de $0^{m},0012 - 0^{m},00066 = 0^{m},00054$ par mètre d'abaissement de la conduite. C'est cette considération qui doit faire placer, autant que possible, l'usine au point bas de la distribution ; on diminue ainsi la pression et par conséquent les fuites. A l'usine de la barrière d'Italie, qui dessert les quartiers bas de l'hôtel de ville, la pression dépasse $0^{m},09$ d'eau dans les gazomètres ; aussi les fuites sont-elles considérables relativement aux autres usines. Le service de la plupart des usines de Paris ne peut être assuré, au moment où la totalité des becs est allumée, que par une pression de $0^{m},08$ à $0^{m},10$ d'eau dans les gazomètres ; pression qui se réduit à $0^{m},06$ ou $0^{m},08$ à l'origine des conduites principales.

On a reconnu par expérience que pour alimenter 2600 becs consommant $0^{mc},10283$ de gaz à l'heure, la pression étant de $0^{m},04$ d'eau, le diamètre du tuyau doit être de $0^{m},162$ ; d'où il résulte que la vitesse du gaz y est de $3^{m},60$ par seconde.

Dans une autre expérience, on a reconnu qu'un tuyau de $0^{m},108$ de diamètre suffisait, sous la pression de $0^{m},027$ d'eau, pour l'écoulement de 288 mètres cubes de gaz à l'heure.

Une distribution de 4 à 5000 becs peut se faire avec une conduite principale continue jusqu'à l'extrémité de $0^m,22$ à $0^m,27$, suivant la longueur du parcours. De cette conduite principale partent des conduites transversa les de $0^m,15$ environ, et, pour les petites rues, les tuyaux ont $0^m,054$ ; c'est le diamètre qu'il convient d'employer pour amener le gaz à 30 becs d'un même établissement ; pour 6 à 8 becs, un tuyau de $0^m,015$ à $0^m,020$ suffit.

Quoique les problèmes soient les mêmes que pour l'eau (168 et suivants), il est fort difficile de dresser des règles invariables pour fixer les diamètres des conduites de gaz. Dans des cas bien déterminés, on peut appliquer les formules des nos 213 et suivants ; mais généralement on doit forcer les diamètres ; c'est une garantie de succès qui n'a d'autre désavantage que d'augmenter le prix.

Il convient de placer les tuyaux de conduite à 1 mètre de profondeur en terre, afin qu'ils ne soient atteints ni par la gelée qui les brise, ni par les vibrations des voitures qui les ébranlent.

*Tuyaux.* Les tuyaux employés pour conduite de gaz sont en fonte, comme pour l'eau (177 et suivants), et en plomb pour les diamètres de 8 à 40 millimètres (179).

Depuis quelque temps, on emploie presque exclusivement à Paris, pour conduire le gaz, des tuyaux en tôle et bitume, imaginés par M. Chameroy. Leur diamètre varie de $0^m,027$ à $0^m,40$. La tôle varie de 1 à 2 millimètres d'épaisseur ; cette dernière épaisseur a été reconnue suffisante pour les plus fortes conduites.

La tôle, bien décapée dans un bain acidulé, est étamée au plomb sur ses bords ; puis courbée dans un laminoir à trois cylindres, dont elle sort avec la forme et la dimension du tuyau qu'on veut fabriquer. On écarte les lèvres du tuyau, et un emporte-pièce fort ingénieux perce à la fois sur les deux bords les trous destinés aux rivets. Les trous ainsi obtenus se superposent parfaitement lorsque le tuyau vient à se refermer. Les rivets, en fer étamé, sont placés au marteau.

A l'une des extrémités du tuyau, on pratique une gorge évasée au moyen de deux cylindres en fonte portant des cannelures inverses l'une de l'autre et roulant l'une sur l'autre ; puis on soude avec soin le tuyau.

Le tuyau ainsi préparé, on coule dans la gorge évasée de son extrémité, au moyen d'un moule intérieur en fonte soutenu par un bouchon de sable, un écrou en métal dur inoxydable, semblable pour sa composition à celui des caractères d'imprimerie ; mais rendu un peu plus résistant par l'addition d'un peu de cuivre rosette. A l'autre extrémité du tuyau, on coule de même, mais extérieurement, un pas de vis, de telle sorte que les tuyaux s'assemblent en se vissant l'un au bout de l'autre, mode d'assemblage supérieur à tous ceux employés jusqu'à ce jour. Le joint s'exécute rapidement au moment de la pose, et il est encore rendu plus intime au moyen d'un enduit composé d'huile et de minium.

Pour fondre les écrous des tuyaux de gros diamètre, M. Chameroy emploie un moule en fonte brisé en trois parties qui s'enlèvent avec la plus grande facilité après le refroidissement. Avant, le moule était d'une seule pièce, et il ne fallait pas moins de six hommes, agissant à l'extrémité d'un levier de 3 mètres, pour le dévisser. Jamais, sous cet effort, l'écrou ne s'est détaché du tuyau.

Dans cet état, le tuyau est rempli d'eau au moyen d'une presse hydraulique, et soumis à une pression de 15 atmosphères. S'il résiste, il est goudronné ; puis on enroule autour une petite corde d'étoupe pour faciliter l'adhérence de la couche bitumineuse dont on va l'entourer. Ce bitume, préparé avec soin dans des proportions rigoureusement déterminées, se compose de bitume, de terre calcaire, de sable, et d'un peu de résine.

Un mandrin traverse le tuyau et sert à le manœuvrer sur une table, où l'on étend le bitume composé sortant de la chaudière. En faisant rouler le tuyau, le bitume s'attache autour, et telle est l'adresse des ouvriers employés à ce travail, que non-seulement tous les tuyaux ont identiquement le même diamètre, mais que leurs poids ne varient pas entre eux d'un 1/2 kilog.

Le tuyau reçoit alors intérieurement une couche de bitume plus fin renfermant moins de matières étrangères que celui qui le couvre extérieurement. Cette couche intérieure a tout le poli et le brillant du plus beau vernis.

Le prix de ces tuyaux est d'environ 40 pour 100 moins élevé que celui des tuyaux en fonte de même diamètre (page 165).

Fig. 70.




*Compteur à gaz.* La *fig.* 70 est la coupe perpendiculaire à l'axe d'un compteur, qui n'est autre chose qu'une espèce de roue à augets formés de tôle galvanisée, placée dans un cylindre horizontal rempli d'eau jusqu'à un niveau convenable. Le tuyau qui amène le gaz pénètre dans le cylindre par le haut d'une de ses extrémités, et vient déboucher dans l'axe de l'appareil en *c*. Le gaz en arrivant presse la palette *a* de l'auget A qu'il remplit, et fait tourner la roue. Sitôt qu'un auget est plein, mais seulement alors, il vient verser son gaz dans la partie supérieure du cylindre enveloppe, où se trouve le tuyau qui le conduit aux becs d'éclairage. Comme tout le gaz est obligé de passer dans les augets, on conçoit que connaissant la capacité des augets et le nombre de tours de la roue, on a la quantité de gaz consommé. Les aiguilles de trois cadrans fixés sur le devant du compteur, mises en mouvement par la roue elle-même, indiquent les volumes de gaz débités.

Le compteur doit être monté parfaitement de niveau, dans un endroit frais, mais protégé contre la gelée, plus bas que les becs qu'il doit desservir. Tous les mois, on doit s'assurer que l'eau a conservé son niveau dans le compteur ; s'il y a une petite différence due à l'évaporation ou à la condensation, par des trous placés à des hauteurs convenables et fermés par des vis, on introduit ou on retire un peu d'eau. On a soin, pendant cette opération, de fermer le robinet de communication avec la canalisation de l'usine.

### ÉTABLISSEMENT DES MANUFACTURES DITES INSALUBRES.

**333.** *Un décret du* 15 *octobre* 1810 et *une ordonnance du* 14 *janvier* 1815 régissent les manufactures et ateliers dangereux, insalubres ou incommodes. Ces établissements sont divisés en trois classes, dont nous allons donner la nomenclature.

#### PREMIÈRE CLASSE.

*Établissements et ateliers qui ne peuvent être formés dans le voisinage des habitations particulières, et pour lesquels il est nécessaire de se pourvoir d'une autorisation de Sa Majesté, accordée en conseil d'État.*

(f.) signifie fabrique de.

Affinage des matières d'or et d'argent par l'acide sulfurique, quand les gaz, dégagés pendant cette opération, sont versés dans l'atmosphère.
Affinage des métaux au fourneau de coupelle, ou au fourneau à réverbère.
Allumettes (f.) préparées avec des poudres, ou matières détonnantes ou fulminantes.
Amidonneries.
Ammoniacaux (f. de sels) par la distillation des matières animales, ou préparées au moyen des eaux de condensation des usines d'éclairage.
Bleu de Prusse (f.) lorsqu'on n'y brûle pas la fumée et le gaz hydrogène sulfuré, etc.
Bleu de Prusse (dépôts de sang destiné à la fabrication du).
Boues et immondices (dépôts de).
Boyaudiers.
Calcination d'os d'animaux lorsqu'on n'y brûle pas la fumée.
Cendres d'orfévres (traitement des) par le plomb.
Cendres gravelées (f.) lorsqu'on laisse répandre la fumée au dehors.
Chairs ou débris d'animaux (dépôts de).
Chanvre (rouissage du) en grand par son séjour dans l'eau.
Charbon animal (f. ou rèvivification du) lorsqu'on ne brûle pas la fumée.
Charbon de terre (épuration du) à vases ouverts.
Chlorures décolorants, *eau de javelle*, chlorures de chaux (f. en grand des) destinés au commerce.
Colle forte (f.).
Cordes à instruments (f.).
Cristalleries.
Cuirs vernis (f.).
Dégras ou huile épaisse à l'usage des tanneurs (f.).
Échaudoirs ou cuisson des débris d'animaux, intestins, etc.
Émaux (f.).
Encre d'imprimerie (f.).
Engrais animaux (dépôts et f.), poudrette, etc.
Équarrissage.
Étoupilles ou amorces fulminantes (f.).
Feutres vernis (f.).
Fourneaux (hauts).
Goudron (fabrication et travail du).
Graisses à feu nu (fonte des).
Huiles de lin (cuisson des).
Huile de pied de bœuf (f.).
Huile de poisson (f.).

Huiles de térébenthine et d'aspic (distillation en grand des).
Huile rousse (f.), extraite des crétons et débris de graisse à une haute température.
Noir d'ivoire et noir d'os (f.), lorsqu'on ne brûle pas la fumée.
Orseille (f.).
Porcheries.
Poudres fulminantes (f.).
Pyro-ligneux (fabrication de l'acide), lorsque les gaz se répandent dans l'air sans être brûlés.
Résines et matières résineuses (travail en grand des), soit pour la fonte et l'épuration de ces matières, soit pour en extraire la térébenthine.
Rouge d'Angleterre (f.) en vases ouverts.
Sabots (ateliers à enfumer les), dans lesquels il est brûlé de la corne ou autres matières animales, dans les villes.
Soufre (f. des fleurs de).
Soufre (distillation du).
Suif (fonderie de) à feu nu.
Sulfate de cuivre (f.), au moyen du soufre et du grillage.
Sulfate de soude (f.) en vases ouverts.
Sulfures métalliques (grillage des).
Sulfurique (f. d'acide).
Tabac (combustion des côtes de) en plein air.
Taffetas et toiles, cirés et vernis (f.).
Tourbe (carbonisation) en vases ouverts.
Tripiers.
Tueries dans les villes dont la population excède 10,000 âmes.
Vernis (f.).
Verreries.

La demande en autorisation des établissements de la première classe est présentée au préfet, et affichée par son ordre dans toutes les communes, à 5 kilomètres de rayon.

Outre cette affiche de demande, il est également procédé à des informations *de commodo et incommodo* par un commissaire spécial.

Tout particulier est admis à présenter ses moyens d'opposition; les maires des communes ont la même faculté.

S'il y a des oppositions, le conseil de préfecture donne son avis, sauf la décision du conseil d'état. S'il n'y a pas d'opposition, la permission est accordée, s'il y a lieu, par le préfet, sans l'autorisation du ministre de l'intérieur.

S'il s'agit de fabrique de soude, ou si la fabrique est établie dans la ligne des douanes, le directeur général des douanes est consulté.

Outre ces formalités, la formation des fabriques de ce genre ne peut avoir lieu qu'après que les agents forestiers en résidence sur les lieux ont donné leur avis sur la question de savoir si la production des bois dans le canton, et les besoins des communes environnantes, permettent d'accorder la permission.

L'autorité locale indique le lieu où les manufactures et ateliers compris dans la première classe peuvent s'établir, et exprime sa distance des maisons particulières. Tout individu qui fait des constructions dans le voisinage de ces manufactures et ateliers, après que la formation en a été permise, n'est plus admis à en solliciter l'éloignement.

La demande en autorisation est présentée sous forme de pétition respectueuse; elle contient les noms, titres et professions du requérant, la désignation bien précise du lieu où sera située l'usine, la nature des opérations qu'on y pratiquera et l'indication des moyens par lesquels on se propose d'éviter les inconvénients, afin que l'administration puisse juger si le lieu projeté pour édifier l'usine est suffisamment éloigné des habitations. Les indications de toute nature doivent être sincères et assez explicites; agir autrement, ce serait s'exposer à voir la requête rejetée, et à voir surgir de bien graves difficultés ultérieures.

A la demande doivent être joints deux exemplaires d'un plan indiquant l'ensemble des appareils, la disposition des ateliers et leur distance aux habitations voisines.

DEUXIÈME CLASSE.

*Établissements et ateliers dont l'éloignement des habitations n'est pas rigoureusement nécessaire ; mais dont il importe néanmoins de ne permettre la formation qu'après avoir acquis la certitude que les opérations qu'on y pratique sont exécutées de manière à ne pas incommoder les propriétaires du voisinage, ni à leur causer des dommages.*

Acier (f.).
Affinage des matières d'or et d'argent par l'acide sulfurique, quand les gaz, dégagés pendant cette opération, sont condensés.
Battoirs à écorce dans les villes.
Bitumes, asphaltes (ateliers pour la fonte et la préparation des).
Blanc de baleine (raffineries de).
Blanc de plomb ou de céruse (f.).
Blanchiment des fils et tissus par le chlore et l'acide sulfureux, gazeux ou liquide.
Bleu de Prusse (f.) lorsqu'elles brûlent leur fumée et le gaz hydrogène sulfuré.
Buanderie des blanchisseurs de profession et les lavoirs qui en dépendent, quand ils n'ont pas un écoulement constant de leurs eaux.
Calcination d'os d'animaux lorsque la fumée est brûlée.
Carbonisation du bois à l'air libre ou en vases clos, lorsqu'elle se pratique dans des établissements permanents, et ailleurs que dans les bois et forêts, ou en rase campagne.
Carton (f.).
Cendres d'orfèvres (traitement des) par le mercure et la distillation des amalgames.
Cendres gravelées (f.) lorsqu'on brûle la fumée, etc.
Chamoiseurs.
Chandelles (f.).
Chapeaux (f.).
Charbon animal (fabrication ou révivification du) lorsque la fumée est brûlée.
Charbon de bois (dépôts de) dans Paris.
Châtaignes (dessiccation des).
Chaux (fours à) permanents.
Chiffonniers.
Chlore (f.).
Chlorures décolorants, *eau de javelle*, *chlorure de chaux* (f.), quand ces produits sont employés dans l'établissement même, ou que la production ne dépasse pas 300 kilog. par jour.
Chromate de potasse (f.).
Chrysalides (dépôts de).
Cire à cacheter (f.).
Colle de peau de lapin (f.).
Corroyeurs.
Couverturiers.
Cuirs verts (dépôts de).
Cuivre (fonte et laminage du).
Cuivre (dérochage du) par l'acide nitrique.
Distilleries d'eaux-de-vie et liqueurs.
Étain (f. de sels d').
Faïence (f.).
Feutre goudronnée propre au doublage des navires (f.).
Fonderies au cubilot.
Fondeurs en grand au fourneau à réverbère.
Forges de grosses œuvres, où l'on fait usage de moyens mécaniques pour mouvoir, soit les marteaux, soit les masses soumises au travail.
Fours à cuire les cailloux destinés à la fabrication des émaux.
Galons et tissus d'or et d'argent (brûleries en grand des).
Gaz d'éclairage (ateliers de).
Harengs (saurage des).
Hongroyeurs.
Huiles essentielles (dépôts d').
Huiles (extraction des huiles et autres corps gras contenus dans les eaux savonneuses des fabriques).
Huiles (épurations en grand des) au moyen de l'acide sulfurique.
Hydrochlorique (f. d'acide) en vases clos.
Lard (ateliers à enfumer le).
Maroquiniers.
Mégissiers.
Morues (dépôts de).
Moulins à broyer le plâtre, la chaux et les cailloux.
Moulins à farine dans les villes.
Nitrique (f. de l'acide), *eau forte*, par la décomposition du nitre, au moyen de l'acide sulfurique, dans l'appareil de Woolf.
Noir de fumée (f.).
Noir d'ivoire et noir d'os (f.) lorsqu'on brûle la fumée.

Noir minéral (carbonisation et préparation des schistes bitumineux pour fabriquer le).
Os (blanchiment des) pour les boutonniers.
Papier (f.).
Parcheminiers.
Phosphore (f.).
Pipes (f.).
Plâtre (fours à) permanents.
Plomb (fonte et laminage du).
Poêles et fourneaux en faïence et terre cuite (f.).
Porcelaine (f.).
Pyro-ligneux (f. de toutes les combinaisons de l'acide) avec le fer, le plomb ou la soude.
Rouge d'Angleterre (f.) en vases clos.
Salaisons (dépôts de).
Secrétage des peaux ou poils de lièvre et de lapin.
Soufre (fusion du) pour l'épurer et le couler en canons.
Sucre (raffineries de).
Suif (fonderies de) au bain-marie ou à la vapeur.
Sulfate de soude (f. du) en vases clos.
Sulfates de fer et de zinc (f.) par la dissolution des métaux dans l'acide sulfurique.
Sulfures métalliques (grillage des) dans des appareils propres à recueillir le soufre et à utiliser l'acide sulfureux qui se dégage.
Tabac (f.).
Tabatières en carton (f.).
Tanneries.
Tôle vernie (f.).
Tourbe (carbonisation de la) en vases clos.
Tuileries et briqueteries.
Vernis à l'esprit-de-vin (f.).
Zinc (usines à laminer le).

Les formalités pour parvenir à l'autorisation sont les mêmes aujourd'hui pour les usines de seconde classe que de première; seulement, l'instruction de la demande est plus sommaire et moins minutieuse, tout en suivant les mêmes phases.

### TROISIÈME CLASSE.

*Établissements et ateliers qui peuvent rester sans inconvénient auprès des habitations particulières, et pour la formation desquels il est néanmoins nécessaire de se munir d'une permission du préfet, qui prend préalablement l'avis du maire et de la police locale.*

Les réclamations qui peuvent avoir lieu contre la décision prise sont jugées en conseil de préfecture.

Acétate de plomb, *sel de Saturne* (f.).
Acétique (f. d'acide).
Ammoniaque ou alcali volatil (fabrication en grand de l').
Ardoises artificielles et mastics divers (f.).
Battage en grand et journalier de la laine et de la bourre.
Batteurs d'or et d'argent.
Blanchiment par les chlorures alcalins.
Blanc d'Espagne (f.).
Bois doré (brûleries de).
Borax (raffinage du).
Bougies (f.).
Boutons métalliques (f.).
Briqueteries ne faisant qu'une seule fournée en plein air, méthode flamande.
Briquets phosphoriques et oxygénés (f.).
Buanderie des blanchisseurs de profession et les lavoirs qui en dépendent quand les eaux ont un écoulement constant.
Camphre (raffinage du).
Caractères d'imprimerie (fonderies de).
Carbonate de soude (f.).
Cendres (laveurs de).
Cendres bleues et autres précipités du cuivre (f.).
Chantiers et dépôts de bois à brûler et de charbon de bois dans les villes.
Chaux (fours à) ne travaillant pas plus d'un mois par année.
Chicorée-café (f.).
Chromate de plomb (f.).
Ciriers.
Colles de parchemin et d'amidon (f.).
Corne (travail de la) pour la réduire en feuilles.
Dégraisseurs.
Doreurs sur métaux.
*Eau seconde* (f.), alcali caustique en dissolution des peintres en bâtiment.

Échaudoirs dans lesquels on traite les animaux pour séparer le poil de la peau.
Encre à écrire (f.).
Engraissage des oies (établissement en grand pour l').
Essayeurs.
Étain (f. de feuilles d').
Féculeries.
Fer-blanc (f.).
Fondeurs au creuset.
Fromages (dépôts de).
Gélatine (f.).
Glaces (étamage des).
Grillage des tissus de coton par le gaz (atelier de).
Laques (f. de).
Lavoirs à laine (établissement des).
Lustrage des peaux.
Moulins à huile.
Nitre ou salpêtre (fabrication et raff. du).
Ocre jaune (calcination de l') pour le convertir en ocre rouge.
Papiers peints (f.).
Plâtre (fours à) ne travaillant pas plus d'un mois par an.
Plomb de chasse (f.).
Potasse (f.).
Potiers d'étain.
Potiers de terre.
Sabots (ateliers à enfumer les).
Savonneries.
Sel (raffineries de).
Sulfate de cuivre (f.) par voie humide.
Sulfate de potasse (raffinage du).
Sulfate de fer et d'alumine; extraction de ces sels des matériaux qui les contiennent tout formés, et transformation du sulfate d'alumine en alun.
Sirop de fécule (extraction du).
Tartre (raffinage du).
Teinturiers.
Toiles peintes (ateliers de).
Tréfileries.
Tueries dans les communes dont la population est au-dessous de 10,000 habitants.
Vacheries dans les villes dont la population excède 5,000 habitants.
Vert-de-gris et verdet (f.).
Viandes (salaison et préparation des).
Vinaigre (f.).

L'accomplissement des formalités prescrites pour l'établissement des manufactures comprises dans ces trois classes, ne dispense pas de celles qui sont prescrites pour la formation des établissements qui sont placés dans le rayon des douanes ou sur une rivière, qu'elle soit navigable ou non.

Les attributions données aux préfets, relativement à la formation des établissements dangereux, insalubres ou incommodes, sont exercées par le préfet de police dans toute l'étendue du département de la Seine, et dans les communes de Saint-Cloud, de Meudon et de Sèvres, du département de Seine-et-Oise.

# TROISIÈME PARTIE.

## Machines à vapeur.

---

384. *Dénomination des machines à vapeur.*

*Machine sans détente ni condensation.* Ce sont les machines dans lesquelles la vapeur agit à pleine pression pendant toute la course du piston, et où elle se dégage librement dans l'atmosphère après son action.

*Machines à condensation sans détente.* Ce sont les machines dans lesquelles la vapeur agit à pleine pression pendant toute la course du piston; mais où elle se condense après son action, de manière à former un vide plus ou moins parfait derrière le piston.

*Machines à détente sans condensation.* Ce sont les machines dans lesquelles la vapeur n'agit à pleine pression que pendant une partie de la course du piston, pour agir seulement en se détendant pendant le reste de la course, et dans lesquelles la vapeur se dégage librement dans l'atmosphère après son action.

*Machines à détente et à condensation.* Ce sont les machines dans lesquelles la vapeur agit à pleine pression pendant une portion de la course du piston et par détente pendant l'autre portion, et dans lesquelles la vapeur se condense après son action.

Les machines à vapeur prennent encore les dénominations de :

*Machines à basse pression.* Ce sont les machines dans lesquelles la pression absolue de la vapeur dans la chaudière est inférieure à 2 atmosphères (313).

*Machines à moyenne pression.* Ce sont les machines où la pression absolue de la vapeur dans la chaudière varie de 2 à 4 atmosphères.

*Machines à haute pression.* Ce sont celles où la pression absolue de la vapeur dans la chaudière dépasse 4 atmosphères. En Amérique, cette pression absolue est portée quelquefois à 10 et jusqu'à 12 atmosphères.

Une machine à vapeur est dite *à simple effet*, quand la vapeur

n'agit que sur une seule face du piston, et *à double effet* quand les deux faces du piston sont alternativement pressées par la vapeur.

Dans l'industrie, on désigne aussi les machines à vapeur par le nom de leurs inventeurs; mais alors on désigne plutôt un mode d'agencement de pièces imaginé par l'inventeur, que le mode d'emploi de la vapeur.

### TRAVAIL THÉORIQUE PRODUIT PAR LA VAPEUR.

**355.** *Travail théorique produit par un kilogramme de vapeur, quand on ne fait pas usage de la détente.* En négligeant le frottement du piston et de sa tige, et en supposant un vide parfait sur l'une des faces du piston, le travail produit par un kilog. de vapeur agissant sur l'autre face est, en supposant qu'il n'y a pas refroidissement de la vapeur,

$$T_m = h\pi r^2 z = Vh.$$

$T_m$ travail produit, en grandes unités dynamiques (34);
$h$ pression de la vapeur sur le piston, exprimée en mètres de hauteur d'eau;
$r$ rayon du piston, en mètres;
$z$ espace parcouru par le piston, en mètres;
$\pi r^2$ surface du piston, en mètres carrés (*Int.*, 668);
$h\pi r^2$ force avec laquelle la vapeur sollicite le piston, en unités de 1000 kilogrammes;
$V = \pi r^2 z$ volume engendré par le piston ou volume d'un kilogramme de vapeur sous la pression $h$.

Si le vide n'existait pas derrière le piston, ou s'il n'était fait qu'imparfaitement, comme cela a toujours lieu dans la pratique, en désignant par $h'$ la pression en mètres d'eau qui en résulterait derrière le piston, on aurait

$$T_m = Vh - Vh' = V(h - h').$$

*TABLEAU des valeurs de* $T_m$, *c'est-à-dire des quantités théoriques de travail produites par un kilogramme de vapeur à différentes pressions, suivant que* $h' = 10^m.3329$, *pression atmosphérique, ou que* $h' = 0$.

| PRESSION ABSOLUE $h$ DE LA VAPEUR | | VALEUR DE $\pi r^2 z$, ou volume de 1 kilogramme de vapeur (272). | VALEUR DE $T_m$ en grandes unités dynamiques, quand | |
|---|---|---|---|---|
| en atmosphères. | en mètres de hauteur d'eau. | | $h' = 0$. | $h' = 10^m.3329$. |
| | | m. cub. | | |
| 0.25 | 2.583 | 6.414 | 15.79 | — 47.39 |
| 0.50 | 5.166 | 3.191 | 16.49 | — 16.49 |
| 0.75 | 7.750 | 2.209 | 17.12 | — 5.71 |
| 1.00 | 10.333 | 1.696 | 17.52 | 0 |
| 1.25 | 12.916 | 1.381 | 17.84 | + 3.57 |
| 1.50 | 15.499 | 1.169 | 18.12 | 6.04 |
| 1.75 | 18.083 | 1.014 | 18.34 | 7.86 |
| 2.00 | 20.666 | 0.896 | 18.52 | 9.26 |
| 2.25 | 23.249 | 0.806 | 18.74 | 10.41 |
| 2.50 | 25.832 | 0.732 | 18.91 | 11.35 |
| 2.75 | 28.416 | 0.671 | 19.07 | 12.13 |
| 3.00 | 31.000 | 0.619 | 19.19 | 12.79 |
| 3.25 | 33.582 | 0.576 | 19.34 | 13.39 |
| 3.50 | 36.165 | 0.538 | 19.46 | 13.90 |
| 3.75 | 38.748 | 0.505 | 19.57 | 14.35 |
| 4.00 | 41.332 | 0.476 | 19.67 | 14.75 |
| 4.25 | 43.915 | 0.449 | 19.72 | 15.08 |
| 4.50 | 46.498 | 0.428 | 19.90 | 15.48 |
| 4.75 | 49.082 | 0.407 | 19.98 | 15.77 |
| 5.00 | 51.665 | 0.389 | 20.10 | 16.08 |
| 5.50 | 56.831 | 0.856 | 20.23 | 16.55 |
| 6.00 | 61.997 | 0.328 | 20.34 | 16.95 |
| 6.50 | 67.164 | 0.306 | 20.55 | 17.39 |
| 7.00 | 72.330 | 0.286 | 20.69 | 17.73 |
| 7.50 | 77.497 | 0.269 | 20.85 | 18.07 |
| 8.00 | 82.663 | 0.254 | 21.00 | 18.37 |
| 8.50 | 87.830 | 0.240 | 21.08 | 18.60 |
| 9.00 | 92.996 | 0.228 | 21.20 | 18.85 |
| 9.50 | 98.163 | 0.217 | 21.30 | 19.06 |
| 10.00 | 103.329 | 0.208 | 21.49 | 19.34 |

D'après ce tableau, on voit que l'avantage de la condensation de la vapeur derrière le piston diminue à mesure que la pression de la vapeur sur le piston augmente; dans la pratique, cet avantage n'est guère réel que pour les pressions qui ne dépassent pas 4 ou 5 atmosphères.

**336.** *Travail théorique produit par un kilogramme de vapeur d'eau quand on emploie la détente.* En admettant la loi de Clément Desormes (269), que la même quantité de chaleur suffit pour constituer vapeur 1 kilog. d'eau, quel que soit le volume de la vapeur, il s'ensuit que la loi de Mariotte sur l'influence de la pression sur le volume des gaz (263) s'applique à la vapeur comme aux gaz, et que, pour un même poids de vapeur, les volumes sont en raison inverse des pressions. Le change-

ment de température de la vapeur modifie cette loi ; mais, comme dans les machines à vapeur la température est peu différente pour les pressions auxquelles on emploie la vapeur, on peut négliger l'effet de la dilatation, dont le coefficient n'est que de 0,00367 environ par degré.

De ces hypothèses, il résulte que le travail total théorique produit par 1 kilog. de vapeur qui agit par détente pendant une portion de la course du piston est, en supposant un vide parfait derrière le piston,

$$T_m = Vh + Vh \log\left(\frac{z}{z_o}\right) \times 2{,}3026.$$

$T_m$ travail produit, en grandes unités dynamiques (34) ;
V volume en mètres cubes du kilog. de vapeur avant la détente, c'est-à-dire à la pression $h$ (tableau du n° 355) ;
$h$ pression de la vapeur avant la détente, en mètres de hauteur d'eau ;
$z$ course totale du piston, en mètres ;
$z_o$ espace parcouru par le piston avant la détente ;
$Vh$ travail produit avant la détente (355) ;

$Vh \log\left(\frac{z}{z_o}\right) \times 2{,}3026$ travail produit par la détente ;

$\frac{1}{0{,}434\,294\,5} = 2{,}3026$ nombre par lequel il faut multiplier le logarithme vulgaire d'un nombre pour avoir un logarithme népérien (*Int.*, 385).

Selon que, dans une machine à vapeur à détente, $\frac{z}{z_o}$ est égal à 2, 3, 4, etc., on dit que la détente est au 1/2, au 1/3, au 1/4, etc.

*TABLEAU des valeurs de* $Vh \log\left(\frac{z}{z_o}\right) \times 2{,}3026$, *c'est-à-dire des quantités de travail théoriques produites par la détente d'un kilog. de vapeur, pour différentes valeurs de* $\frac{z}{z_o}$, *le travail* Vh *produit avant la détente* (355) *étant représenté par* 1.

| VALEUR DE $\frac{z}{z_o}$. | TRAVAIL dû à la détente. | VALEUR DE $\frac{z}{z_o}$. | TRAVAIL dû à la détente. |
|---|---|---|---|
| 1 | 0.000 | 7 | 1.946 |
| 2 | 0.693 | 8 | 2.079 |
| 3 | 1.098 | 9 | 2.197 |
| 4 | 1.386 | 10 | 2.3026 |
| 5 | 1.609 | 15 | 2.708 |
| 6 | 1.791 | 20 | 2.996 |

Dans la pratique, il ne convient guère d'aller au delà de $\frac{z}{z_o} = 10$ ; car, une fois cette limite dépassée, le vide imparfait derrière le piston et

les divers frottements de la machine absorbent en général un travail plus considérable que celui correspondant produit par la vapeur; c'est-à-dire qu'une fois le piston arrivé au point qui donne $\frac{z}{z_o} = 10$, le travail produit par la machine pendant le reste de la course du piston est négatif (371).

## MACHINES A VAPEUR SANS DÉTENTE NI CONDENSATION.

**337.** *Effet d'une machine à vapeur sans détente ni condensation.* D'après ce qui a été dit n° 355, l'effet théorique produit par la vapeur dépensée en une seconde est

$$\mathcal{T}'_m = V(h - h') = \pi r^2 v(h - h').$$

$\mathcal{T}'_m$ travail développé par la vapeur dépensée en une seconde;
$V = \pi r^2 v$ volume engendré par le piston ou volume de vapeur dépensé par seconde;
$v$ vitesse moyenne du piston par seconde;
$h$ pression absolue de la vapeur dans le cylindre;
$h'$ pression derrière le piston.

Pour avoir le travail moteur pratique que peut transmettre en une seconde l'arbre du volant de la machine, il faut affecter $\mathcal{T}'_m$ d'un coefficient $k$ qui dépend des différentes résistances passives de la machine, et auquel on ne peut assigner de valeur moyenne qu'en estimant en bloc ces résistances; ainsi, on a, en représentant par $\mathcal{T}_m$ ce travail pratique,

$$\mathcal{T}_m = k\mathcal{T}'_m = \pi r^2 v k(h - h').$$

On a théoriquement $h' = 10^m,333$, pression atmosphérique; mais, à cause de la faible valeur de l'ouverture du tiroir, qui est le 1/25 de la section du cylindre dans les machines à basse pression, et le 1/60 seulement dans les machines à haute pression, la vapeur ne sort pas librement du cylindre, et on a $h' = 10^m,333$ plus 1/10 à 1/8 de $10^m,333$.

D'après M. Poncelet, quand le tuyau qui amène la vapeur de la chaudière au cylindre a un diamètre convenable, la tension de la vapeur est de 1/20 moins élevée dans la chemise que dans la chaudière; mais il convient, dans l'établissement d'une machine, afin de ne pas être en défaut, de compter, pour des pressions de 4 à 5 atmosphères, que la tension absolue de la vapeur est de 1/2 atmosphère moins élevée dans le cylindre que dans la chaudière.

Le diamètre du tuyau qui amène la vapeur varie du 1/7 au 1/8 de celui du piston; cependant, pour une machine de 12 à 16 chevaux, il ne convient guère de donner à ce tuyau moins de $0^m,055$ de diamètre.

*TABLEAU des valeurs moyennes du coefficient* k *pour des machines en bon état ordinaire d'entretien.*

| FORCE DE LA MACHINE. | VALEUR DE $k$. |
|---|---|
| De 4 à 8 chevaux. | 0.61 |
| De 10 à 20 *id.* | 0.70 |
| De 30 à 50 *id.* | 0.79 |
| De 60 à 100 *id.* | 0.85 |

En tenant la machine dans un mauvais état d'entretien, les valeurs du coefficient $k$ diminuent sensiblement; il convient, pour l'établissement d'une machine qui doit être bien tenue, de ne compter que sur les valeurs précédentes.

**338.** *Calcul des dimensions d'une machine sans condensation ni détente.* Soit à déterminer, par exemple, les dimensions d'une telle machine capable de faire fonctionner la machine soufflante du haut fourneau de Framont. Ce fourneau, marchant au charbon de bois, rapporte M. Morin, a $9^m,10$ de hauteur; la machine lui fournit par seconde $0^{mc},462$ d'air froid à la pression de $0^m,049$ de mercure près de la buse, qui a $0^m,08$ de diamètre; le rapport du volume d'air lancé au volume engendré par le piston est de 0,718, et le travail absorbé est 8 chevaux.

Pression absolue de la vapeur dans le cylindre 3,5 atmosphères; il conviendrait de timbrer la chaudière à 4 atmosphères environ (314);
Vitesse moyenne du piston par seconde, $0^m,90$;
Valeur de $k=0,61$;
Valeur de $h=10^m,333\times 3,5=36^m,17$;
Valeur de $h'=10^m,333\times 1,125=11^m,63$.

Remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule

$$T_m=\pi r^2 vk(h-h'),$$

on a

$$8\times 0,075=3,14\times r^2\times 0,90\times 0,61(36,17-11,63),$$

d'où l'on tire $r=0^m,12$, et par suite le diamètre du piston $d=0^m,24$.

Le volume de vapeur dépensé est, par seconde,

$$\pi r^2 v=3,14\times 0,12\times 0,12\times 0,90=0^{mc},0407,$$

et par heure

$$0^{mc},0407\times 3600=147 \text{ mètres cubes.}$$

La densité de la vapeur à 3,5 atmosphères étant 0,00185886 (n° 272), le poids de vapeur dépensé par heure est

$$1^k,859\times 147=273 \text{ kilog.}$$

Comme dans une machine, même bien faite, il y a 1/20 de perte de

vapeur, la dépense de vapeur est donc $273 + \frac{273}{20} = 287$ kilog.; quantité qu'il faut encore augmenter de son 1/10 environ, pour tenir compte du refroidissement de toutes les parties qui contiennent la vapeur, et qu'on suppose ne donner lieu à aucune fuite; de sorte que, pour obtenir la force de 8 chevaux, il faut former 316 kilog. de vapeur, c'est-à-dire 39 kilog. environ par force de cheval.

Supposant que 1 kilog. de houille produise 5,50 kilog. de vapeur (308), on en brûlera $\frac{316}{5,50} = 57,5$ kilog. pour obtenir la force de 8 chevaux; ce qui fait 7,2 kilog. par force de cheval et par heure. Pour une plus forte machine, cette quantité serait moindre.

On peut diminuer la consommation de combustible de 1/10 environ en chauffant à 70° ou 80° l'eau d'alimentation, qui est moyennement à 12°, avec la vapeur qui sort du cylindre.

Supposant que chaque mètre carré de surface de chauffe produise 20 kilog. de vapeur (307), cette surface sera de $\frac{316}{20} = 15^{mc},80$; ce qui fait $1^{mc},98$ par force de cheval. Cette surface serait moins considérable pour des machines puissantes. A cause des fuites accidentelles de vapeur qui peuvent avoir lieu, il vaut toujours mieux avoir un excès de surface de chauffe.

Dans toutes les machines à vapeur, on devrait prendre la hauteur du cylindre égale au diamètre, afin que, pour un même volume, la surface totale du cylindre, qui est une surface refroidissante à l'intérieur aussi bien qu'à l'extérieur, fût un minimum; mais, pour diminuer le renouvellement des espaces nuisibles, on augmente la hauteur du cylindre. Les machines sans détente ni condensation consommant beaucoup de combustible, elles ne sont employées que dans les cas où la machine doit être simple, ou dans les localités riches en combustible; on tient alors peu compte du refroidissement du cylindre, dont la hauteur varie de 1,8 à 2,5 fois le diamètre.

On peut rendre bien étanche le piston en donnant à sa garniture métallique une hauteur de $0^{m},05$ à $0^{m},06$.

En Angleterre, la vitesse du piston est de 3 pieds par seconde ($0^{m},914$); en France, elle varie de $0^{m},80$ à $1^{m},10$; en Amérique, on l'a portée à 2 mètres, $2^{m},50$ et même 3 mètres. Dans les locomotives (quatrième partie), la course des pistons étant de $0^{m},46$, et le diamètre des roues motrices de $1^{m},67$, ce qui fait $5^{m},24$ de circonférence, à la vitesse de 10 lieues à l'heure, chaque piston parcourt en une seconde

$$\frac{10 \times 4000}{3600} \times \frac{2 \times 0,46}{5,24} = 1^{m},95.$$

Cette vitesse atteint jusqu'à $3^{m},50$.

Le nombre de coups de piston (un coup de piston comprend une montée et une descente), c'est-à-dire de tours de volant, varie de 25 à 30 par minute pour des machines de 15 à 20 chevaux; au-dessous de 15 chevaux, on va à 35 et même 40 coups. Dans l'exemple précédent de locomotives, le nombre de coups est 127.

La pression absolue de la vapeur dans la chaudière varie de 5 à 6 atmosphères; au-dessus de cette limite, les fuites de vapeur et les sujétions engendrées par une aussi forte pression compensent l'augmentation de travail; de plus, la marche de la machine est irrégulière. En France, on ne dépasse pas 7 atmosphères; en Angleterre, on se tient ordinairement entre 3 et 4 atmosphères; en Amérique, on se trouve bien de marcher à 10 atmosphères, et on atteint jusqu'à 12 atmosphères.

359. *Travail absorbé par l'alimentation d'une chaudière.* Lorsque la pression absolue dans la chaudière est une atmosphère, le travail théorique absorbé pour y introduire un kilogramme d'eau est nul; si cette pression est 2 atmosphères, ce travail est $10^{km},333$, et si elle est $n+1$ atmosphère, ce travail devient $10^{km},333 \times n$ : ainsi, pour $n+1=3$ atmosphères, il est $10,333 \times 2 = 20^{km},666$. Le travail pratique est double du travail théorique; de sorte que, dans ce cas, il est de $41^{km},332$, c'est-à-dire les 0,0032 de l'effet théorique 12790 kilogrammètres, produit par 1 kilog. de vapeur à la même pression et sans condensation (355). Ce rapport augmente rapidement avec la pression; ainsi, à $n+1=6$ atmosphères, il est 0,0061, et à $n+1=10$ atmosphères, 0,0096.

360. *Volant.* Le volant se calcule à l'aide de la formule

$$P = \frac{4645n}{mV^2} K, \qquad \text{(page 67)}$$

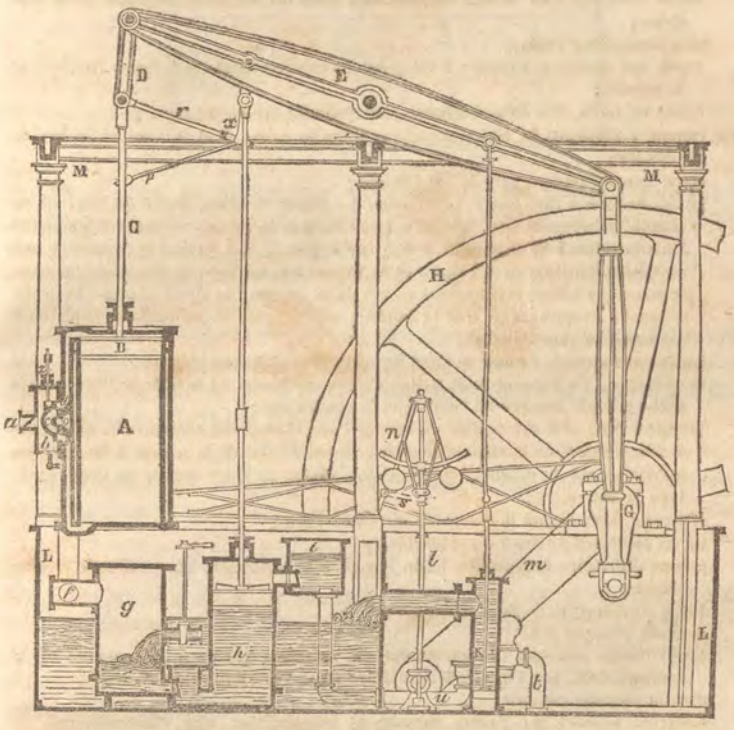
dans laquelle, pour les machines à balancier et pour le coefficient de régularité de Watt $K=32$, le coefficient numérique 4645 est applicable aux bielles infinies, et devient 5227, 5528, 5829, suivant que la longueur de la bielle est respectivement égale à 6, 5, 4 fois celle de la manivelle. Pour les machines sans balancier, la longueur de la bielle étant égale à 5 fois celle de la manivelle, pour $K=32$, le coefficient numérique est respectivement 5592, 1531, 416 pour une manivelle simple, deux manivelles à angle droit, trois manivelles faisant des angles égaux.

### MACHINES A VAPEUR A CONDENSATION SANS DÉTENTE.

361. Les machines à condensation sans détente sont les machines dites de Watt, dans lesquelles la pression de la vapeur est ordinairement inférieure à 1,25 atmosphère.

La fig. 71 est la coupe par l'axe d'une de ces machines. Quoiqu'il n'y a peut-être pas deux constructeurs qui composent leurs machines identiquement l'un comme l'autre, quand on aura bien compris la description suivante, on ne sera nullement embarrassé pour s'expliquer le mécanisme d'une machine à vapeur quand on la verra toute montée ou en dessin, quel que soit du reste le système de la machine.

Fig. 71.




A cylindre à vapeur, entouré d'une enveloppe en fonte pour diminuer le refroidissement;

B piston;

C tige;

D *grandes chapes* du parallélogramme; elles s'articulent avec le balancier et avec un petit axe qui porte un manchon dans lequel se fixe le haut de la tige C;

*x* *chapes de la pompe à air* et de la pompe alimentaire; elles sont reliées au milieu de leur longueur par un axe auquel sont fixées les tiges des pompes à air et à eau froide;

*r* *guides* formant un parallélogramme avec l'axe du balancier et les chapes; ils s'articulent à leurs extrémités avec des axes, dont l'un est percé d'une lunette pour laisser passer les tiges de pompes;

*p* *contre-guides* ou *contre-balanciers;* ils s'articulent à une extrémité avec le petit axe à lunette dont il vient d'être question, et à l'autre à des petits axes fixés à l'entablement de la machine. Le mouvement horizontal de ces contre-guides étant contraire à celui du balancier, il en résulte que la tige C et celles des pompes se meuvent verticalement;

E balancier; il communique le mouvement à la manivelle G, par l'intermédiaire de la bielle;

G manivelle fixée sur l'arbre moteur;

H volant monté sur l'arbre moteur;

L bache en fonte dans et sur laquelle sont fixés les différents organes de la machine;

M entablement en fonte;

*a* tuyau qui amène la vapeur; il est garni d'une valve destinée à régler l'arrivée de la vapeur;

*b* caisse en fonte, dite *boîte à vapeur*, dans laquelle arrive la vapeur;

*d* et *e* canaux établissant la communication entre la caisse *b* et le haut et le bas du cylindre;

*o* canal communiquant avec le condenseur;

*c* tiroir destiné à distribuer la vapeur. Le piston B étant arrivé en haut de sa course, supposons que la tige *z* fasse baisser le tiroir, le canal *d* débouche dans la caisse *b* et la vapeur arrive sur le piston, tandis que le canal *o* se met en communication avec celui *e* et la vapeur qui est sous le piston va au condenseur. Le piston étant arrivé au bas de sa course, la tige *z* soulève le tiroir, le canal *e* communique avec la boîte *b*, celui *d* avec le condenseur, le piston B remonte, et ainsi de suite;

*f* tuyau par lequel la vapeur se rend du canal *o* dans le condenseur;

*g* condenseur; un robinet dont la tige s'élève au-dessus du niveau de l'eau dans la bache L règle l'entrée de l'eau dans le condenseur;

*h* *pompe à air;* elle est destinée à retirer l'eau chaude du condenseur. La pompe d'alimentation de la chaudière étant placée à côté de la pompe à air, elle est invisible dans le dessin; elle foule une partie de l'eau chaude du condenseur dans la chaudière;

*i* réservoir dans lequel la pompe à air élève l'eau;

*u* tuyau de départ de l'eau du réservoir *i;*

K pompe élévatoire fournissant toute l'eau froide nécessaire au service de la machine;

*t* tuyau d'aspiration de l'eau froide;

*n* pendule conique (123);

*s* levier coudé recevant le mouvement du manchon inférieur du pendule et le transmettant, par l'intermédiaire d'une tige, à la valve régulatrice *a;*

*l* axe du pendule conique;

*m* courroie passant sur l'arbre moteur et transmettant, par l'intermédiaire de roues coniques, le mouvement à l'axe *l* du pendule conique.

Le fond et le couvercle du cylindre se garnissent de robinets.

**362.** *Effet d'une machine à vapeur à condensation sans détente.* D'après ce qui a été dit (355), l'effet théorique $\mathcal{T}'_m$ produit dans une telle machine, par la vapeur dépensée en une seconde, est, en représentant par $h'$ la pression due au vide imparfait derrière le piston,

$$\mathcal{T}'_m = \mathrm{V}(h - h') = \pi r^2 v(h - h').$$

Le travail pratique dont on peut disposer sur l'arbre du volant est

$$T_m = kT'_m = \pi r^2 vk(h - h'). \qquad (a)$$

Les différentes lettres de ces formules ont les mêmes significations qu'aux nos 355 et 357.

*TABLEAU des valeurs moyennes du coefficient* k.

| FORCE DE LA MACHINE. | VALEUR DE $k$. |
|---|---|
| De 4 à 8 chevaux. | 0.60 |
| De 10 à 20 *id.* | 0.67 |
| De 30 à 50 *id.* | 0.73 |
| De 60 à 100 *id.* | 0.78 |

**363.** *Calcul des dimensions d'une machine à condensation sans détente.* Soit à déterminer les dimensions d'une machine capable de faire fonctionner 62 machines à lainer les draps, semblables à celles de l'établissement de la Vierge, à Sedan, où, d'après M. Poncelet, une machine de 20 chevaux en fait fonctionner 50.

La force de la machine est de 25 chevaux environ. Supposons la pression absolue de la vapeur dans le cylindre égale à une atmosphère, la pression derrière le piston à 1/7 d'atmosphère, et la vitesse moyenne du piston à 1 mètre par seconde.

On a $k = 0{,}70$, $h = 10^m{,}333$, $h' = 1^m{,}476$ et $v = 1$ mètre.

Remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule précédente $(a)$, on a

$$25 \times 0{,}075 = 3{,}14 \times r^2 \times 1 \times 0{,}70(10{,}333 - 1{,}476);$$

d'où l'on tire $r = 0^m{,}31$, et par suite le diamètre du piston $d = 0^m{,}62$.

Le volume de vapeur dépensé par seconde est

$$\pi r^2 v = 3{,}14 \times 0{,}31 \times 0{,}31 \times 1 = 0^{m.cub.}{,}302 ;$$

ce qui fait par heure

$$0{,}302 \times 3600 = 1086 \text{ mètres cubes.}$$

A 1 atmosphère, la densité de la vapeur étant 0,00058955 (n° 272), le poids de vapeur dépensé par heure est

$$0{,}58955 \times 1086 = 640 \text{ kilogrammes.}$$

Dans une bonne machine de ce genre, il faut augmenter cette dépense de vapeur de 1/10 pour tenir compte des pertes qui ont lieu dans les tiroirs, entre les fonds du cylindre et le piston, par les fuites et par le refroidissement; de sorte que la dépense réelle de vapeur est de 704 kilog. par heure.

En alimentant avec de l'eau à 40°, 1 kilog. de houille produisant facilement 6 kilog. de vapeur (308), on en brûlera $\frac{704}{6} = 117{,}33$ kilog. pour obtenir la force de 25 chevaux; ce qui fait 4,70 kilog. par force de cheval et par heure. Dans la pratique, cette consommation est ordinairement de 5 à 6 kilog. pour les petites machines, et de $4^{k},50$ à 5 kilog. pour les grandes.

Supposant que chaque mètre carré de surface de chauffe produise 25 kilog. de vapeur à l'heure (307), cette surface sera de $\frac{704}{25} = 28{,}16$ mètres carrés, ce qui fait $1^{mc},13$ par force de cheval; souvent on ne prend qu'un mètre carré par force de cheval, et quelquefois on va jusqu'à $1^{mc},40$.

La surface refroidissante du cylindre est la plus petite possible, pour le même volume, quand la hauteur du cylindre est égale à son diamètre (358). En enveloppant le cylindre d'un corps mauvais conducteur de la chaleur, on rendrait presque nul le refroidissement extérieur. La chemise que l'on met au cylindre empêche la vapeur de se condenser contre ses parois, chaque fois qu'il est mis en communication avec le condenseur. Le rapport de la longueur au diamètre du cylindre, adopté par Watt et Boulton, a varié de 1,75 jusqu'à 3; mais la valeur la plus commune est 2,7.

La vitesse du piston varie de $0^{m},90$ à $1^{m},10$ par seconde; on va à $1^{m},30$ pour les fortes machines de 70 chevaux. Le nombre de tours de volant varie de 20 à 28 par minute.

La condensation permet de marcher à de très-basses pressions; ainsi, dans les machines de Watt, avec chaudière en tombeau, la pression absolue de la vapeur dans la chaudière varie ordinairement de 1 atmosphère 1/4 à 1 atmosphère 1/3, et la pression dans le cylindre est quelquefois inférieure à 1 atmosphère, mais le plus souvent elle est 1 atmosphère. La pression absolue de la vapeur dans le cylindre étant 1 atmosphère, il convient de timbrer la chaudière à 1 atmosphère 1/4.

Le diamètre du tuyau qui conduit la vapeur de la chaudière aux tiroirs est le 1/5 au moins de celui du cylindre, d'où il résulte que la vitesse du piston est à celle de la vapeur dans ce tuyau comme 1 est à 25. La section de tous les passages et orifices de circulation de la vapeur est aussi égale au 1/25 de celle du piston. La valve régulatrice ne doit intercepter que les 0,25 de ce passage dans sa position normale. La largeur des lumières se prend environ égale à quatre ou cinq fois leur hauteur, et l'ouverture réellement démasquée par le tiroir ne peut pas être sensiblement moindre que 1/25 de la surface du piston.

Les passages et tuyaux de départ de vapeur doivent avoir des sections au moins égales à celles des orifices et tuyaux d'admission.

**364.** *Quantité d'eau nécessaire à la condensation de la vapeur. Capacité du condenseur et de la pompe à air. Pompe de puits.*

Le poids d'eau nécessaire pour condenser la vapeur dépensée est donné par la formule

$$Q(t'-t)=P(650-t'),$$

d'où l'on tire

$$Q=\frac{P(650-t')}{t'-t}.$$

Q poids d'eau nécessaire;
P poids de vapeur dépensé;
650 nombre d'unités de chaleur contenu dans un kilogramme de vapeur (269);
$t$ température de l'eau avant la condensation;
$t'$ température de l'eau après la condensation.

Supposant P=1 kilog., $t=10°$ et $t'=50°$, on a

$$Q=\frac{650-50}{40}=15 \text{ kilog.};$$

ce qui fait à peu près 15 litres.

*TABLEAU de la quantité d'eau, à différentes températures, nécessaire pour condenser un kilogramme de vapeur, et de la pression dans le condenseur, en négligeant la force élastique de l'air que laisse dégager l'eau, force élastique qui s'ajoute à celle de la vapeur* (274).

| TEMPÉRATURE de l'eau avant la condensation. | TEMPÉRATURE de l'eau après la condensation. | PRESSION dans le condenseur (272). | VOLUME d'eau employé. |
|---|---|---|---|
| | | atmosph. | litres. |
| 10° | 50° | $\frac{1}{8,6}$ | 15.00 |
| *Id.* | 40 | $\frac{1}{14,3}$ | 20.33 |
| *Id.* | 30 | $\frac{1}{25}$ | 31.00 |

L'eau de rivière contient ordinairement 1/20 de son volume d'air; cet air se dégage dans le condenseur et produit une pression qui est en raison inverse de la capacité du condenseur, et qui s'ajoute à la force élastique de la vapeur. Ainsi, en condensant à 50°, ce qui correspond à 1/8,6 atmosphère de pression, les 15 litres d'eau froide employés contiennent $\frac{15}{20}=0^{l},75$ d'air à la pression atmosphérique; supposant

que la capacité que cet air occupe dans le condenseur soit de $0{,}75 \times 8{,}6 = 6^{l},45$, sa force élastique devient égale, en négligeant l'effet de la dilatation, à 1/8,6 atmosphère, et cette force élastique s'ajoutant à celle de la vapeur, qui est aussi 1/8,6 atmosphère, la pression dans le condenseur est $\frac{1}{8,6} + \frac{1}{8,6}$ atmosphère. Si la capacité occupée par l'air dans le condenseur était $6,45 \times 2$ litres, sa force élastique ne serait plus que de $\frac{1}{8,6 \times 2}$, et la pression dans le condenseur serait réduite à $\frac{1}{8,6} + \frac{1}{8,6 \times 2}$ atmosphère. On voit donc que la pression dans le condenseur est d'autant plus petite que la capacité du condenseur est plus grande. Watt a reconnu que, pour des pressions absolues de 1 atmosphère 1/4 à 1 atmosphère 1/3 de la vapeur dans la chaudière, le volume de la pompe à air devait être le 1/8 de celui du cylindre à vapeur, et le volume du condenseur égal à celui de la pompe à air. Avec ces proportions, la pression derrière le piston à vapeur n'est pas très-grande, et le travail absorbé par le frottement du piston de la pompe à air, travail qui dépend du diamètre et de la course de ce piston, ne dépasse pas une limite raisonnable.

La pression dans le condenseur et par suite derrière le piston, le volume d'eau et d'air à extraire du condenseur, et la profondeur de laquelle on est obligé d'élever l'eau de condensation, guident dans le choix de la température à laquelle il convient de condenser. Pour des profondeurs de puits de 8 à 10 mètres, il convient de condenser à 35 ou 40°; pour des puits plus profonds, on condense à 44 et même à 50°, et on ne doit plus condenser dès que la profondeur du puits atteint 30 ou 40 mètres.

La profondeur de puits à laquelle on peut se passer de pompe élévatoire est au maximum de 6 mètres ou $6^{m},50$; au delà de cette limite, malgré le grand diamètre qu'il convient toujours de donner au tuyau d'aspiration, l'eau n'arrive plus dans le condenseur avec une vitesse suffisante.

Pour la machine de 25 chevaux (363), en condensant à 40°, avec de l'eau froide à 10°, la quantité d'eau froide nécessaire à la condensation des 704 kilog. de vapeur dépensés par heure sera de

$$704 \times \frac{650 - 40}{40 - 10} = 14312 \text{ kilog.};$$

ce qui fait 573 kilog, par force de cheval.

Cette quantité est un minimum que l'on ne peut atteindre dans la pratique; l'expérience prouve que la pompe de puits doit élever 1000 kil. d'eau par force de cheval et par heure, c'est-à-dire 25000 kilog. pour

une machine de 25 chevaux. Quand la machine marche bien, 1/5 de cette eau reste disponible.

363. *Volant.* Il se calcule avec la même formule et les mêmes coefficients que pour les machines sans détente ni condensation (360).

366. L'*Artisan-Club*, réunion d'ingénieurs et de mécaniciens qui a fait paraître à Londres, sous le patronage du gouvernement, un traité de la machine à vapeur, donne la formule suivante pour calculer les proportions du cylindre à vapeur (extrait du *Traité des machines à vapeur* de MM. Bataille et Jullien) :

$$P = \frac{d^2 \sqrt[3]{l}}{47}. \qquad (a)$$

P force de la machine en chevaux-vapeur;
$d$ diamètre du cylindre en pouces;
$l$ course du piston en pieds.

P étant toujours exprimé en chevaux-vapeur, mais $d$ en centimètres et $l$ en décimètres, la formule précédente devient

$$P = \frac{d^2 \sqrt[3]{l}}{437}.$$

Quoique le traité de l'*Artisan-Club* n'indique pas à quel genre de machines s'applique cette formule, comme la pression de la vapeur n'y entre pas, il est évident qu'elle ne peut s'appliquer qu'à une pression déterminée. Comme en partant des bases d'établissement des machines de Boulton et Watt, qui fonctionnent toutes avec une pression moyenne effective de 7 livres par pouce carré ($0^k,492$ par centimètre carré), et une vitesse de piston, exprimée en pieds par minute, égale à environ 128 fois la racine cubique de la course, on parvient à l'expression ($a$) pour la puissance de la machine, on doit admettre que c'est aux machines à basse pression que s'applique cette formule, qui a servi à calculer la table suivante, qui donne les valeurs de P en chevaux.

| DIAMÈTRE du cylindre en pouces anglais et en centimètres. | Course du piston en pieds anglais et en décimètres. | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 2p.5 = 7dm.62 | 3p = 9dm.14 | 3p.5 = 10dm.7 | 4p = 12dm.2 | 4p.5 = 13dm.7 | 5p = 15dm.2 | 5p.5 = 16dm.8 | 6p = 18dm.3 | 6p.5 = 19dm.8 | 7p = 21dm.3 | 7p.5 = 22dm.9 | 8p = 24dm.4 | 8p.5 = 25dm.9 | 9p = 27dm.4 | 9p.5 = 29dm.0 |
| p. c. m. | chev. | chev. | chev. | chev. | chev | chev. | chev. | chev. | chev. | chev. | chev. | chev. | chev. | chev. | chev. |
| 12 = 30.5 | 4.16 | 4.42 | 4.65 | 4 86 | 5.06 | 5.24 | 5.41 | 5.57 | 5.72 | 5.86 | 5.99 | 6.13 | 6.25 | 6.37 | 6.49 |
| 14 = 35.6 | 5.66 | 6.01 | 6.33 | 6.62 | 6.88 | 7.13 | 7.36 | 7.58 | 7.78 | 7.98 | 8.16 | 8.34 | 8.51 | 8 67 | 8.83 |
| 16 = 40.6 | 7.39 | 7 86 | 8.27 | 8.65 | 8.99 | 9.31 | 9.61 | 9.90 | 10.16 | 10.42 | 10.66 | 10.89 | 11.12 | 11.33 | 11.54 |
| 18 = 45.7 | 9.36 | 9.94 | 10.47 | 10.94 | 11.38 | 11.79 | 12.17 | 12.53 | 12.86 | 13.19 | 13.49 | 13.79 | 14.07 | 14.34 | 14.60 |
| 20 = 50.8 | 11.55 | 12.27 | 12.92 | 13.51 | 14.05 | 14.55 | 15.02 | 15.46 | 15.88 | 16.28 | 16.66 | 17.02 | 17.37 | 17.70 | 18.02 |
| 22 = 55.9 | 13.98 | 14.85 | 15.63 | 16.62 | 17.30 | 17.65 | 18.18 | 18.71 | 19.22 | 19.70 | 20 16 | 20.60 | 21.01 | 21.42 | 21.81 |
| 24 = 61.0 | 16.63 | 17.67 | 18.61 | 19.45 | 20.23 | 20.95 | 21.63 | 22.27 | 22.87 | 23.44 | 23.99 | 24.51 | 25.01 | 25.49 | 25.96 |
| 26 = 66.0 | 19.52 | 20.75 | 21.84 | 22.56 | 23.75 | 24.60 | 25.39 | 26.14 | 26.84 | 27.51 | 28.15 | 28.78 | 29.35 | 29.92 | 30.46 |
| 28 = 71.1 | 22 64 | 24.06 | 25.33 | 26.48 | 27.54 | 28.52 | 29.44 | 30.31 | 31.13 | 31.90 | 32.65 | 33.36 | 34.04 | 34.69 | 35.33 |
| 30 = 76.2 | 25.99 | 27.62 | 29.07 | 30 40 | 31.61 | 32.74 | 33.80 | 34.80 | 35.74 | 36.63 | 37.48 | 38.30 | 39.08 | 39.83 | 40.56 |
| 32 = 81.3 | 29.57 | 31.42 | 33.08 | 34.59 | 35.97 | 37.26 | 38.46 | 39.59 | 40.66 | 41.68 | 42.64 | 43.57 | 44.46 | 45.32 | 46.14 |
| 34 = 86.4 | 33.39 | 35.44 | 37.34 | 39.04 | 40.60 | 42.06 | 43·41 | 44.69 | 45.90 | 47.05 | 48.14 | 49.19 | 50.20 | 51.16 | 52.08 |
| 36 = 91.4 | 37.42 | 39.77 | 41.87 | 43.77 | 45.52 | 47.15 | 48.67 | 50.11 | 51.46 | 52.75 | 53.97 | 55.15 | 56.28 | 57.36 | 58.40 |
| 38 = 96.5 | 41.69 | 44.46 | 46.64 | 48.77 | 50.72 | 52.54 | 54.23 | 55.83 | 57.34 | 58.78 | 60.13 | 61.45 | 62.70 | 63.91 | 65.06 |
| 40 = 102 | 46.20 | 49.10 | 51.69 | 54.04 | 56.20 | 58.21 | 60.09 | 61.86 | 63.53 | 65.12 | 66.63 | 68.08 | 69.47 | 70.81 | 72.10 |
| 42 = 107 | 50.94 | 54.13 | 56.98 | 59.58 | 61 96 | 64.18 | 66.25 | 68.21 | 70.04 | 71.78 | 73.45 | 75.06 | 76.60 | 78.06 | 79.49 |
| 44 = 112 | 55 91 | 59.38 | 62.54 | 66.46 | 68.00 | 70.44 | 72.71 | 74.85 | 76.87 | 78.79 | 80.63 | 82.38 | 84.06 | 85.68 | 87.23 |
| 46 = 117 | 61.10 | 64.88 | 68.19 | 71.43 | 74.33 | 76.99 | 79.47 | 81.84 | 84.02 | 86.12 | 88.14 | 90.04 | 91.86 | 93.64 | 95.34 |
| 48 = 122 | 66.53 | 70.70 | 74.42 | 77.82 | 80.94 | 83.83 | 86.53 | 89.08 | 91.49 | 93.78 | 95.95 | 98.04 | 100.0 | 102.0 | 103.8 |
| 50 = 127 | 72.19 | 76.71 | 80.76 | 84 44 | 87.82 | 90.96 | 93 89 | 96.65 | 99.27 | 101.7 | 104.1 | 106.4 | 108.5 | 110.6 | 112.6 |
| 52 = 132 | 78.08 | 83.00 | 87.35 | 90.25 | 94.98 | 98.40 | 101.55 | 104.5 | 107.4 | 110.0 | 112.6 | 115.1 | 117.4 | 119 6 | 121.8 |
| 54 = 137 | 84.20 | 89.48 | 94.20 | 98.49 | 102.4 | 106.1 | 109,5 | 112.7 | 115.8 | 118.7 | 121.4 | 124.1 | 126 6 | 129.0 | 131.4 |
| 56 = 142 | 90.55 | 96.23 | 101.30 | 105.9 | 110.1 | 114.1 | 117.8 | 121.2 | 124.5 | 127.6 | 130.6 | 133.4 | 136.2 | 138.8 | 141.3 |
| 58 = 147 | 97.14 | 103.2 | 108.6 | 113.6 | 118.2 | 122 4 | 126.3 | 129.9 | 133.4 | 136.7 | 139.9 | 143.1 | 145.9 | 148.7 | 151.4 |
| 60 = 152 | 103.9 | 110.4 | 116.3 | 121.6 | 126.4 | 131.0 | 135.2 | 139.2 | 142.9 | 146 5 | 149.9 | 153.2 | 156.3 | 159.3 | 162.2 |
| 62 = 157 | 111.00 | 117.96 | 124.18 | 129.81 | 135.03 | 139.86 | 144.37 | 148.7 | 152.8 | 156.7 | 160.3 | 163.6 | 167.1 | 170 3 | 173.4 |
| 64 = 163 | 118.3 | 125.7 | 132.3 | 138 3 | 143.9 | 149.0 | 153.82 | 158.4 | 162.6 | 166.7 | 170.6 | 174.3 | 177.8 | 184.3 | 184.6 |
| 66 = 168 | 125.8 | 133.6 | 140.7 | 147.3 | 153.0 | 158.5 | 163.60 | 168.4 | 173.0 | 177.3 | 181.4 | 185.4 | 189.1 | 192.8 | 196.2 |
| 68 = 173 | 133.6 | 141.8 | 149.4 | 156.2 | 162.4 | 168.2 | 173.6 | 178.8 | 183.6 | 188 2 | 192.6 | 196.8 | 200.8 | 204.6 | 208.3 |
| 70 = 178 | 141.5 | 150.4 | 158 3 | 165.5 | 172 1 | 178.2 | 184.0 | 189.4 | 194.6 | 199.4 | 204.0 | 208.5 | 212.8 | 216.8 | 220.8 |
| 72 = 183 | 149.7 | 159.1 | 167.4 | 175.1 | 182.1 | 188.6 | 194.7 | 200.4 | 205.8 | 211.0 | 215.9 | 220.6 | 225.1 | 229.4 | 233.6 |
| 75 = 190 | 162.4 | 172.6 | 181.7 | 190.0 | 197.6 | 204.6 | 211.2 | 217.4 | 223.3 | 229.0 | 234.2 | 239.4 | 244.2 | 248,9 | 253.4 |
| 80 = 203 | 184 8 | 196.4 | 206.7 | 216.1 | 224.8 | 232,8 | 240.4 | 247.4 | 254.1 | 260 5 | 266.5 | 272 3 | 277.9 | 283 2 | 288.4 |
| 85 = 216 | 208.6 | 221.8 | 232.8 | 242.8 | 253.0 | 262.9 | 271.4 | 279.3 | 286.9 | 294.0 | 300.9 | 307.4 | 313.7 | 319.8 | 325.6 |
| 90 = 229 | 233.9 | 248.6 | 261.7 | 273.6 | 284.5 | 294.7 | 304.2 | 313.2 | 321.6 | 329.7 | 337.3 | 344.7 | 351.7 | 358.5 | 365.0 |
| 95 = 241 | 260.6 | 276.8 | 290.9 | 305.4 | 317.0 | 328 4 | 339.0 | 348.9 | 358.4 | 367.4 | 375.8 | 384.0 | 391.9 | 399.4 | 406.7 |
| 100 = 254 | 288.8 | 306.8 | 323.0 | 337.7 | 351.2 | 363.8 | 375.6 | 386.6 | 397.0 | 407.0 | 416.5 | 425.5 | 434.2 | 442.6 | 450.6 |

## MACHINES A VAPEUR A DÉTENTE SANS CONDENSATION.

**367.** *Effet d'une machine à vapeur à détente sans condensation.* L'effet théorique $T''_m$ produit dans une telle machine, par la vapeur dépensée en une seconde, est, en supposant nulle la pression derrière le piston (356),

$$T''_m = Vh + Vh \log\left(\frac{z}{z_o}\right) \times 2{,}3026.$$

$h'$ étant la pression derrière le piston, ce travail devient (355)

$$T'_m = T''_m - V\frac{z}{z_o}h' = Vh + Vh\log\left(\frac{z}{z_o}\right) \times 2{,}3026 - V\frac{z}{z_o}h'$$

ou

$$T'_m = Vh\left(1 + \log\left(\frac{z}{z_o}\right) \times 2{,}3026 - \frac{h'}{h} \times \frac{z}{z_o}\right).$$

V volume de vapeur non détendue, dépensé par seconde;

$V\frac{z}{z_o}$ volume engendré par le piston en une seconde;

$V\frac{z}{z_o}h'$ travail absorbé par $h'$ en une seconde.

$h' = 10^m,333$ théoriquement; mais, dans la pratique, à cause de la résistance de la vapeur dans les tuyaux d'échappement et de la vitesse avec laquelle elle se dégage, $h'$ augmente de 1/12 à 1/10 d'atmosphère quand la vitesse du piston s'écarte peu de 1 mètre par seconde et que le diamètre du tuyau d'échappement varie de 1/7 à 1/8 de celui du piston.

Pour avoir le travail pratique $T_m$ dont on peut disposer sur l'arbre du volant, il faut encore affecter la valeur de $T''_m$ d'un coefficient $k$ qui dépend des différentes résistances passives de la machine; ainsi, on a

$$T_m = Vhk\left(1 + \log\left(\frac{z}{z_o}\right) \times 2{,}3026 - \frac{h'}{h} \times \frac{z}{z_o}\right). \qquad (a)$$

*TABLEAU des valeurs moyennes du coefficient* k.

| FORCE DE LA MACHINE. | VALEUR DE $k$. |
|---|---|
| De 4 à 8 chevaux. | 0.45 |
| De 10 à 20 *id.* | 0.58 |
| De 30 à 50 *id.* | 0.70 |
| De 60 à 100 *id.* | 0.84 |

368. *Calcul des dimensions d'une machine à vapeur à détente sans condensation.*

Force de la machine, 12 chevaux.

Pression absolue de la vapeur dans le cylindre avant la détente, 5 atmosphères.

Détente au 1/3 (356).

On a

$$k=0{,}58,\quad h=10{,}333\times 5=51^{m},67,$$

et

$$h'=10{,}333+\frac{10{,}333}{10}=11{,}367,\quad \frac{z}{z_0}=3\quad\text{et}\quad \log\left(\frac{z}{z_0}\right)=0{,}477.$$

Remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule (*a*) du numéro précédent, il vient

$$0{,}075\times 12=V\times 51{,}67\times 0{,}58\left(1+0{,}477\times 2{,}3026-\frac{11{,}367}{51{,}67}\times 3\right),$$

d'où l'on tire $V=0{,}021$ de mètre cube.

Le volume de vapeur après la détente est alors $0^{m},021\times 3=0^{mc},063$.

Supposant la vitesse du piston égale à $0^{m},90$ par seconde, on a, en représentant par $d$ le diamètre du piston,

$$\frac{\pi d^2}{4}\times 0^{m},90=0{,}063,\quad\text{d'où}\quad d=0^{m},298.$$

A 5 atmosphères, la densité de la vapeur étant 0,00257363 (272), le poids de vapeur dépensé en une heure est donc $2{,}573\,63\times 0{,}021\times 3600=194^{k},57$.

On augmente encore cette dépense de 1/10 pour tenir compte des pertes de vapeur qui ont lieu dans les tiroirs, entre les fonds du cylindre et le piston, et par le refroidissement; de sorte que pour une machine de 12 chevaux, la dépense de vapeur est $194{,}57+\frac{194{,}57}{10}=214$ kilog.; ce qui fait 17,83 kilog. par force de cheval et par heure.

Supposant qu'un kilog. de houille produit 6 kilog. de vapeur (308), comme cela a lieu quand on chauffe l'eau d'alimentation à 70 ou 80° au moyen de la vapeur qui se dégage, on en brûlera $\frac{214}{6}=36$ kilog. environ, ce qui fait 3 kilog. par force de cheval et par heure. Dans la pratique, pour des forces inférieures à 20 chevaux, la pression absolue de la vapeur dans la chaudière variant de 4 à 5 atmosphères, et la détente étant au 1/3, il faut compter sur $3^{k},5$ à 4 kilog. de houille et quelquefois plus, par force de cheval et par heure; cette consommation est moindre pour des machines plus puissantes.

Chaque mètre carré de la surface de chauffe produisant 20 kilog. de vapeur à l'heure (307), cette surface sera, pour une machine de

12 chevaux, $\frac{214}{20} = 10^{mc},7$, ce qui fait $\frac{10,7}{12} = 0^{mc},89$ environ par force de cheval; dans la pratique, on compte ordinairement sur 1 à $1^{mc},25$ par force de cheval.

En général, la pression absolue de la vapeur dans la chaudière varie de 4 à 5 atmosphères; lorsqu'elle est de 4 atmosphères, la détente est au 1/2, et lorsqu'elle est de 5 atmosphères, la détente est au 1/3. M. Cavé a porté la pression dans la chaudière jusqu'à 7 atmosphères pour des machines de bateau; en Amérique, cette pression varie de 9 à 11 atmosphères et on détend au 1/3.

Il y a des machines à détente fixe et des machines à détente variable.

Les cylindres de ces machines n'ont pas d'enveloppe.

La vitesse du piston varie ordinairement entre 1 mètre et $1^{m},50$; pour les machines rapides puissantes destinées à faire mouvoir directement les forges ou les hélices de bateaux, cette vitesse varie de $1^{m},50$ à 2 mètres; on l'a même portée à $2^{m},50$ dans une même machine de 100 chevaux construite au Creusot. Dans une machine de 20 chevaux du système Flaud, la course du piston est $0^{m},25$, et le nombre de coups doubles est de 250 par minute, ce qui correspond à une vitesse de $2^{m},08$ par seconde.

La section des lumières d'entrée est le 1/17 environ de celle du piston, et celle des lumières de sortie, le 1/11.

**369.** *Volant.* Le volant se calcule à l'aide de la formule du n° 360, dans laquelle faisant $k=32$, le coefficient numérique 4645 prend les valeurs du tableau suivant :

| MACHINE | PRESSION. | DÉTENTE AU | $k$ |
|---|---|---|---|
| A balancier à un seul cylindre, la bielle étant égale à 5 fois la manivelle. . . . . | 5 atmosph. | $\frac{1}{2}$ | 7080 |
| | | $\frac{1}{3}$ | 8186 |
| | | $\frac{1}{4}$ | 9218 |
| | | $\frac{1}{5}$ | 10231 |
| | 6 atmosph. | $\frac{1}{2}$ | 6975 |
| | | $\frac{1}{3}$ | 7949 |
| | | $\frac{1}{4}$ | 8914 |
| | | $\frac{1}{5}$ | 9695 |
| | | $\frac{1}{6}$ | 10651 |
| *Id.* bielle infinie. . . . . | 5 atmosph. | $\frac{1}{3}$ | 7064 |
| Sans balancier, bielle = 5 maniv.. | 6 atmosph. | $\frac{1}{4}$ | 8598 |
| A cylindre oscil. de M. Cavé, *id.*. . | 6 atmosph. | $\frac{1}{2}$ | 7292 |

## MACHINES A VAPEUR A DÉTENTE ET CONDENSATION.

**370.** *Machines à deux cylindres, dites machines de Woolf.* Il y a des machines à détente et condensation qui n'ont qu'un cylindre à vapeur, et d'autres qui en ont deux. Dans ces dernières, qui sont les machines de Woolf, la vapeur agit simultanément à pleine pression sur le petit piston, et par détente sur le grand piston et derrière le petit. En supposant un vide parfait derrière le grand piston, l'effort théorique exercé par les pistons sur le balancier, à un instant quelconque de leur course, est

$$P = sh + (S - s)\frac{hc}{c + d(S - s)}.$$

P effort théorique exercé par les tiges des pistons sur le balancier en unités de 1000 kilog.;
$s$ surface du petit piston en mètres carrés;
$h$ pression exercée par la vapeur non dilatée, sur le petit piston, en mètres de hauteur d'eau;
S surface du grand piston en mètres carrés;
$c$ capacité du petit cylindre moins le volume du piston, en mètres cubes;
$d$ distance des pistons aux extrémités des cylindres qu'ils viennent de quitter, en mètres.

Le premier terme $sh$ de la valeur de P est la pression transmise par la vapeur non dilatée. Le volume de la vapeur non dilatée étant $c$, et le volume qu'elle occupe quand les pistons ont parcouru l'espace $d$ étant $c + d(S - s)$, sa force élastique est $\frac{hc}{c + d(S - s)}$ (356), et la pression qu'elle transmet au balancier, $(S - s)\frac{hc}{c + d(S - s)}$.

Supposant, dans la formule précédente, que l'on a $S = 5s$, ce qui revient à une machine à un cylindre dont la détente est au 1/5, on trouve, pour une valeur quelconque de $h$, que les valeurs relatives de P, au commencement, au milieu et à la fin de la course des pistons, sont respectivement 20, 9,33 et 7,2. Ainsi, du commencement à la fin de la course des pistons, les efforts sur le balancier varient dans le rapport de 20 à 7,2 ou de 2,78 à 1; au lieu que dans une machine à un seul cylindre, détendant au 1/5, ces efforts varient dans le rapport de 5 à 1.

Dans les machines à un cylindre, le changement d'effort de la vapeur sur le balancier étant plus brusque que dans celles à deux cylindres, il a moins d'influence sur la marche du volant, dont le poids n'a pas besoin d'être beaucoup plus fort que pour une machine à deux cylindres de même force; de sorte que, par un petit excès de poids donné au volant, on obtient une marche aussi régulière avec une machine à un cylindre qu'avec une machine à deux, on supprime un cylindre, et

on simplifie les tiroirs et tout le mécanisme, tout en augmentant l'effet de la vapeur.

**371.** *Effet d'une machine à vapeur à détente et condensation.* Que la machine soit à un ou à deux cylindres, l'expression du travail moteur dont on peut disposer sur l'arbre du volant est la même que pour les machines à détente sans condensation (367); ainsi, on a

$$T_m = Vhk\left(1 + \log\left(\frac{z}{z_0}\right) \times 2{,}3026 - \frac{h'}{h} \times \frac{z}{z_0}\right).$$

Les mêmes lettres ont les mêmes significations qu'aux nos 356 et 367.

$\frac{z}{z_0}$ exprime, pour une machine à deux cylindres, le rapport de la capacité du grand cylindre à celle du petit.

$h'$, qui est la pression derrière le piston pour une machine à un cylindre, et derrière le grand piston pour une machine à deux cylindres, varie de 1/7 à 1/9 d'atmosphère pour une température de 40° dans le condenseur, une vitesse de piston de 1 mètre par seconde et une très-grande section pour le tuyau allant du cylindre au condenseur (363).

*TABLEAU des valeurs du coefficient* k *pour une machine à un cylindre.*

| FORCE DE LA MACHINE. | VALEUR DE $k$. |
|---|---|
| De 4 à 8 chevaux. | 0.41 |
| De 10 à 20 *id.* | 0.52 |
| De 30 à 50 *id.* | 0.63 |
| De 60 à 100 *id.* | 0.74 |

Pour une machine à deux cylindres, il conviendrait de diminuer les valeurs précédentes de $k$ de leur dixième environ.

Pour les petites machines à deux cylindres, la détente est ordinairement au 1/4, et pour les grandes elle est au 1/5.

Pour les machines à un cylindre, il n'y a pas de règle pour fixer la détente; ordinairement elle est au 1/5, et dans les épuisements, les machines qui communiquent le mouvement aux pompes sans mouvement de rotation détendent quelquefois au 1/8. Les machines à détente et condensation sont à moyenne ou à haute pression (354); mais les machines à basse pression peuvent aussi être à détente, c'est ce qui a lieu sur beaucoup de bateaux à vapeur.

Dans ces derniers temps, pour des machines très-bien établies et entretenues, on a porté la détente jusqu'à 1/15 et même plus; cela est surtout avantageux quand les machines produisent momentanément un

travail très-faible relativement à leur travail normal. Pour ces limites, dans les machines à deux cylindres, la détente commence dans le petit cylindre.

**372.** *Calcul des dimensions d'une machine à détente et condensation à un seul cylindre.*

Force de la machine 40 chevaux, d'où $k = 0{,}63$ ; $h = 3$ atm. $= 3^{m},00$ et $h' = 1/8$ d'atm. $= 1^{m},292$ ; détente au cinquième, ce qui donne $\frac{z}{z_o} = 5$ et $\log\left(\frac{z}{z_o}\right) = 0{,}69897$.

Remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule

$$T_m = Vhk\left(1 + \log\left(\frac{z}{z_o}\right) \times 2{,}3026 - \frac{h'}{h} \times \frac{z}{z_o}\right), \qquad (a)$$

on a

$$0{,}075 \times 40 = V \times 31 \times 0{,}63\left(1 + 0{,}69897 \times 2{,}3026 - \frac{1{,}292}{31} \times 5\right),$$

d'où l'on tire

$$V = 0^{mc},064.$$

V' étant le volume de vapeur après la détente, c'est-à-dire le volume total engendré par le piston, on a

$$V' = 0^{mc},064 \times 5 = 0^{mc},32.$$

Supposant la vitesse du piston égale à $1^{m},30$ par seconde, on a

$$\frac{\pi d^2}{4} \times 1^{m},30 = 0^{mc},32;$$

d'où l'on tire le diamètre du piston $d = 0^{m},56$.

Pour une machine à deux cylindres, on opérerait de la même manière; seulement, dans l'équation précédente, $\frac{\pi d^2}{4} \times 1^{m},30$ serait remplacé par la nouvelle expression du volume de vapeur détendue dépensé par seconde, et dans la formule $(a)$, on remplacerait $\frac{z}{z_o}$ par le rapport du volume de la vapeur détendue à celui de la vapeur à pleine pression. Quand la vapeur ne se détend que dans le grand cylindre, ce rapport est celui des capacités des cylindres; si l'admission de la vapeur cesse et que la détente commence dans le petit cylindre aux 2/3 de la course du piston, ce rapport est celui de la capacité du grand cylindre aux 2/3 de la capacité du petit cylindre.

On est assez dans l'usage de placer les axes des cylindres dans le plan de mouvement du balancier, les distances horizontales des axes du petit et du grand cylindre à l'axe de rotation du balancier étant dans le rapport de 3 à 4. Le tableau suivant a été dressé par M. Morin, d'après cette disposition.

| FORCE en chevaux | VITESSE | | COURSE | | DIAMÈTRES CORRESPONDANTS aux pressions dans la chaudière de | | | | | | NOMBRE de tours de volant par 1'. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | 4.5 atm. | | 4 atm. | | 3.5 atm. | | |
| | du grand piston. | du petit piston. | du grand piston. | du petit piston. | grand cylind. | petit cylind. | grand cylind. | petit cylind. | grand cylind. | petit cylind. | |
| | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | |
| 4 | 0.90 | 0.675 | 0.90 | 0.675 | 0.282 | 0.140 | 0.268 | 0.158 | 0.196 | 0.174 | 30.0 |
| 6 | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.342 | 0.177 | 0.350 | 0.192 | 0.358 | 0.211 | *id.* |
| 8 | 1.00 | 0.750 | 1.00 | 0.750 | 0.371 | 0.192 | 0.382 | 0.209 | 0.389 | 0.229 | *id.* |
| 10 | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.414 | 0.214 | 0.423 | 0.232 | 0.432 | 0.254 | *id.* |
| 12 | *id.* | *id.* | 1.10 | 0.825 | 0.448 | 0.232 | 0.458 | 0.251 | 0.469 | 0.276 | 27.3 |
| 14 | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.480 | 0.248 | 0.491 | 0.269 | 0.502 | 0.295 | *id.* |
| 16 | *id.* | *id.* | 1.20 | 0.90 | 0.509 | 0.263 | 0.520 | 0.285 | 0.531 | 0.313 | 27.5 |
| 18 | 1.10 | 0.825 | *id.* | *id.* | 0.513 | 0.265 | 0.524 | 0.286 | 0.535 | 0.314 | *id.* |
| 20 | *id.* | *id.* | 1.30 | 0.975 | 0.534 | 0.276 | 0.545 | 0.299 | 0.538 | 0.328 | 25.4 |
| 22 | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.555 | 0.287 | 0.567 | 0.311 | 0.581 | 0.342 | *id.* |
| 24 | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.575 | 0.297 | 0.587 | 0.322 | 0.601 | 0.354 | *id.* |
| 26 | 1.15 | 0.865 | 1.45 | 1.09 | 0.580 | 0.300 | 0.593 | 0.325 | 0.607 | 0.357 | 25.8 |
| 28 | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.599 | 0.309 | 0.611 | 0.335 | 0.625 | 0.368 | *id.* |
| 30 | *id.* | *id.* | 1.60 | 1.20 | 0.615 | 0.318 | 0.630 | 0.345 | 0.642 | 0.378 | 24.6 |
| 36 | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0 661 | 0.342 | 0.674 | 0.369 | 0.688 | 0.405 | *id.* |
| 40 | 1.25 | 0.938 | 1.70 | 1.275 | 0.658 | 0.340 | 0.673 | 0.368 | 0.686 | 0.404 | 22.1 |
| 45 | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.696 | 0.360 | 0.711 | 0.390 | 0.727 | 0.428 | *id.* |
| 50 | *id.* | *id.* | 1.80 | 1.35 | 0.735 | 0.380 | 0.750 | 0.411 | 0.769 | 0.452 | 20.8 |
| 60 | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.805 | 0.416 | 0.821 | 0.450 | 0.840 | 0.494 | *id.* |
| 70 | 1.30 | 0.975 | 2.00 | 1.50 | 0.850 | 0.440 | 0.870 | 0.477 | 0.890 | 0.524 | 19.5 |
| 80 | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 0.910 | 0 470 | 0.930 | 0 510 | 0.953 | 0.560 | *id.* |
| 90 | *id.* | *id.* | 2.10 | 1.575 | 0.968 | 0.500 | 0.987 | 0.541 | 1.010 | 0.594 | 18.6 |
| 100 | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 1.032 | 0.526 | 1.040 | 0.570 | 1.065 | 0.626 | *id.* |
| 110 | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 1.070 | 0 552 | 1.090 | 0.598 | 1.113 | 0.656 | *id.* |
| 120 | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 1.115 | 0.577 | 1.140 | 0.624 | 1.163 | 0.685 | *id.* |
| 130 | *id.* | *id.* | *id.* | *id.* | 1.160 | 0.600 | 1.185 | 0.650 | 1.210 | 0.713 | *id.* |

Dans l'application précédente, le volume de vapeur, à la pression $h$, dépensé par heure est

$$0^{mc},064 \times 3600 = 230,40 \text{ mètres cubes.}$$

La densité de la vapeur à 3 atmosphères étant 0,00161453 (272), le poids de vapeur dépensé par heure est

$$1,61453 \times 230,40 = 372 \text{ kilog.}$$

Augmentant cette dépense de 1/8 pour compenser les pertes et le refroidissement, elle devient 418 kilog. Pour des petites machines, la fraction 1/8 serait un peu faible.

Un kilogramme de houille produisant 6 kilog. de vapeur, on en brûlera, pour obtenir la force de 40 chevaux, $\frac{418}{6} = 69{,}7$ kilog., c'est-à-dire $1^k{,}74$ par force de cheval et par heure. Dans la pratique, il faut compter sur $2^k{,}5$ à 3 kilog. pour les machines à un cylindre en bonne marche, et sur $3^k{,}0$ à $3^k{,}5$ pour les machines à deux cylindres. En soignant très-bien les machines, ces consommations peuvent encore diminuer sensiblement. Dans le Cornouailles, on est arrivé, pour des machines d'épuisement communiquant le mouvement aux pompes sans arbre de rotation, à ne brûler qu'un kilog. de houille par force de cheval et par heure (page 224).

M. Farcot a établi des machines à longue détente qui n'ont consommé que $1^k{,}30$ par force de cheval. Ce résultat a été aussi obtenu par MM. Le Gavriant et Farinaux (de Lille), pour des machines de Woolf, mais à cylindres séparés. Une machine horizontale à haute pression de MM. Thomas et Laurens, détendant au 1/15 environ de la course du piston, qui commande directement l'arbre de l'usine, a donné des résultats analogues aux précédentes. La vapeur, avant d'agir sur le piston, enveloppe le cylindre latéralement et sur les fonds; le piston a $0^m{,}60$ de diamètre, $1^m{,}20$ de course, et il donne 35 coups doubles par minute; cette grande vitesse a permis de ne donner qu'un poids modéré au volant.

En supposant que chaque mètre carré de surface de chauffe produise seulement 20 kilog. de vapeur à l'heure, pour la force de 40 chevaux, cette surface sera de $\frac{418}{20} = 20^{mc}{,}90$; ce qui fait $0^{mc}{,}52$ par force de cheval. Il ne convient guère, dans la pratique, de prendre moins de $0^m{,}80$ de surface de chauffe par force de cheval, surtout pour les machines faibles, et souvent même on dépasse 1 mètre carré.

Le volume du condenseur est le même que pour les machines sans détente (364), c'est-à-dire le 1/8 de celui du cylindre à vapeur. Le volume de la pompe à air est aussi égal à celui du condenseur. L'expérience prouve que la pompe à eau froide doit élever 600 litres d'eau par force de cheval et par heure.

La section des lumières d'admission varie de 1/20 à 1/30 de celle du piston, et celle des lumières de départ varie de 1/15 à 1/20.

**373.** *Volant.* Admettant le coefficient de régularité $k = 32$ de Watt, le poids du volant des machines à détente et condensation se calcule à l'aide de la formule du n° 360, dans laquelle le coefficient numérique 4645 prendra les valeurs du tableau suivant.

| DÉSIGNATION DES MACHINES. | PRESSION en atm. | DÉTENTE. | COEFFICIENT. |
|---|---|---|---|
| A un seul cylindre et à balancier. . . . . | 5 | $\frac{1}{3}$ | 7204 |
| | | $\frac{1}{4}$ | 7619 |
| | | $\frac{1}{5}$ | 7843 |
| | | $\frac{1}{6}$ | 8104 |
| | | $\frac{1}{7}$ | 8315 |
| | | $\frac{1}{8}$ | 8449 |
| A un seul cylindre sans balancier. . . . . | 5 | $\frac{1}{3}$ | 6666 |
| A un seul cylindre, sans balancier, bielle égale à 5 fois la manivelle. — Manivelle simple. . . . . | 5 | $\frac{1}{5}$ | 7619 |
| *Id.* double à angle droit. | | | 1819 |
| *Id.* triple à angles égaux. | | | 657 |
| A 2 cylindres, à balancier, bielle égale à 5 fois la manivelle. — Détente dans le grand cylindre seulement. . . | 4.5 | $\frac{1}{4.5}$ | 5538 |
| Détente commençant aux 2/3 de la course du petit piston. . . . . | | $\frac{1}{7.5}$ | 6031 |
| Oscillante de M. Cavé. . . . . | 5 | $\frac{1}{3}$ | 7442 |

Le diamètre moyen du volant varie de 3,5 ou 4 fois la course des pistons pour les machines à deux cylindres, et de 4 à 4,5 fois pour les machines à un seul cylindre, à haute pression, avec ou sans détente, sans balancier.

374. *Emploi des vapeurs autres que la vapeur d'eau, comme force motrice.* Connaissant la température d'ébullition d'une substance (270 et 281), sa chaleur spécifique (266), sa chaleur latente de vaporisation (269), et la densité de sa vapeur (45), on peut déterminer la quantité de chaleur absorbée pour former un volume donné de vapeur, et par suite connaître, sous le rapport du combustible brûlé, l'avantage qu'offrirait l'emploi de sa vapeur comme force motrice (355).

*TABLEAU de quelques substances dont les vapeurs sont susceptibles d'être employées comme force motrice.*

| DÉSIGNATION des substances. | TEMPÉRATURE d'ébullition. | DENSITÉ de la substance. | CHALEUR spécifique. | DENSITÉ de la vapeur. | CHALEUR latente. |
|---|---|---|---|---|---|
| Eau. . . . . | 100°0 | 1.000 | 1.000 | 0.624 | 536.5 |
| Alcool. . . . . | 78.4 | 0.792 | 0.622 | 1.613 | 207.0 |
| Éther sulfurique. . . . . | 37 8 | 0.7155 | 0.520 | 2.586 | 96.8 |
| Essence de térébenthine. . | 157.0 | 0.8697 | 0.472 | 5 013 | 76.8 |
| Huile de naphte. . . . . | 85.5 | 0.85 | » | 2.85 | 81.0 |
| Sulfure de carbone. . . . . | 47.0 | 1.263 | » | 2.645 | » |
| Ammoniaque. . . . . | à 10°, pression 6,5 asmosph. | | | 0.597 | » |
| Acide carbonique. . . . . | à 0°, *id.* 36 *id.*<br>à —11°, *id.* 26 *id.* | | | 1.524 | très-grande. |

Jusqu'à présent, on n'a employé avec succès que la vapeur d'eau. Cependant, les essais récents de M. Ericson pour construire des machines à air chaud, et surtout ceux de M. du Tremblay pour établir des machines binaires dans lesquelles la vapeur d'eau, après son effet sur un piston, est utilisée pour vaporiser un autre liquide dont la vapeur agit sut un second piston, paraissent avoir donné quelques résultats. La vapeur d'eau, après son action sur le piston, passe dans un condenseur de Hall, formé d'une capacité fermée, traversée par une série de nombreux tubes contenant le second liquide à vaporiser. Ce liquide doit bouillir à une température aussi faible que possible, et inférieure à 72°; il ne doit pas se décomposer au-dessous de 110 à 120°, ni attaquer les métaux dont la machine est composée, et donner lieu à des mélanges inflammables ou explosibles. Le chloroforme, appliqué par M. Lafond, et le chlorure de carbone, employé pour la première fois à Londres par M. du Tremblay, satisfont à toutes ces conditions; l'éther sulfurique leur est encore préférable; mais comme il ne satisfait pas à la dernière condition, on ne doit lui donner la préférence que quand on peut aérer ou isoler les machines. Pour une machine de 25 chevaux, travaillant 12 heures par jour, depuis 18 mois, la perte de chlorure de carbone paraît n'avoir été que de 3/4 de litre par jour. Ce liquide ne coûte que 2$^{r}$,50 le litre; les autres sont également d'un prix minime.

373. *Notions sur le prix des machines à vapeur.* A Paris, les machines que l'on construit le plus sont à haute pression, à détente sans condensation; leur prix, pour des forces qui ne dépassent pas 20 chevaux, était, il y a quelques années, de 1000 fr. par cheval, plus 3000 à 4000 fr. par machine; de sorte que $n$ étant la force de la machine en chevaux, son prix était de 1000 $(n+3)$ fr. ou 1000 $(n+4)$ fr.

Dans ce prix se trouvait compris la chaudière, mais non celle de rechange, et un bout de tuyau de 5 mètres de longueur. Le mécanicien ne fournissait que le monteur pour la pose de la machine; tous les autres frais de montage étaient à la charge du propriétaire.

Au-dessus de la force de 20 chevaux, il n'y avait pas de prix courant.

Il n'y a guère de prix déterminés pour les machines à condensation; elles sont plus chères que les autres, quoique, à force égale de machine, la chaudière soit moins coûteuse.

Le prix des machines à deux cylindres variait, il y a quelques années, de 1800 à 2000 fr. par cheval; aujourd'hui, il est compris entre 1200 et 1400 fr. par cheval.

*Prix d'achat et de pose d'une machine à vapeur de la force de 20 chevaux, à deux cylindres et à condensation, et de tous ses accessoires.*

| | | |
|---|---|---|
| Achat de la machine et de sa chaudière. . . . . | 25 000 fr. | |
| Transport, faux frais et pose. . . . . | 1 000 | |
| Fourneau et cheminée de 25 mètres de hauteur, en briques. . . . . | 5 000 | |
| Chambre de la machine. Fondation. Puits. . . . . | 6 000 | en moyenne |
| Achat d'une deuxième chaudière et des accessoires (portes, grilles, armatures...) du fourneau. . . . . | 4 000 | |
| Construction du fourneau de la deuxième chaudière. . | 1 500 | |
| Total. . . . . | 42 500 fr. | |

Si la machine était à un cylindre, la dépense diminuerait de 2500 fr. environ.

*TABLEAU des valeurs actuelles des machines à balancier mises en place, avec leur chaudière et les accessoires, tous frais compris, d'après MM. Bataille et Jullien.*

| FORCES des machines en chevaux. | MACHINES SANS DÉTENTE | | MACHINES A DÉTENTE | | PRIX moyens par 1 kilog. de métal. |
|---|---|---|---|---|---|
| | sans condensation. | à condensation. | sans condensation. | à condensation. | |
| | fr. | fr. | fr. | fr. | fr. |
| 1.20 | 1 540 | 2 000 | 1 760 | 2 000 | 2.24 |
| 2.00 | 2 600 | 3 360 | 2 970 | 3 400 | 2.09 |
| 3.20 | 3 800 | 4 900 | 4 350 | 4 950 | 1.85 |
| 4.70 | 5 390 | 6 950 | 6 150 | 7 000 | 1.71 |
| 6.00 | 7 300 | 8 450 | 8 300 | 9 500 | 1 62 |
| 9.00 | 9 550 | 12 400 | 10 000 | 12 450 | 1.53 |
| 12.00 | 12 200 | 15 800 | 14 000 | 15 850 | 1.46 |
| 15.60 | 15 250 | 19 700 | 17 400 | 19 800 | 1.42 |
| 19.80 | 18 650 | 24 200 | 21 250 | 24 200 | 1.36 |
| 24.80 | 22 500 | 28 600 | 25 700 | 29 300 | 1.33 |
| 30.60 | 26 700 | 34 500 | 30 600 | 35 000 | 1.30 |
| 37.00 | 31 600 | 40 650 | 36 200 | 41 200 | 1.27 |
| 44.80 | 36 700 | 47 500 | 42 000 | 48 000 | 1.23 |
| 54.00 | 41 800 | 54 000 | 48 000 | 54 200 | 1.20 |
| 63.20 | 49 000 | 63 100 | 56 000 | 64 000 | 1.19 |
| 74.60 | 56 000 | 72 000 | 63 500 | 72 500 | 1.17 |
| 87.00 | 63 200 | 81 700 | 72 000 | 82 000 | 1.14 |
| 111.00 | 79 200 | 102 500 | 90 200 | 103 500 | 1.11 |
| 138.50 | 97 500 | 126 500 | 111 000 | 127 000 | 1.08 |
| 170.00 | 118 500 | 153 000 | 135 000 | 154 000 | 1.06 |
| 207.00 | 142 000 | 184 000 | 162 000 | 185 000 | 1.05 |
| 248.00 | 168 000 | 218 000 | 192 000 | 219 000 | 1.02 |
| 295.00 | 197 000 | 255 000 | 225 000 | 257 000 | 1.00 |
| 348.00 | 230 000 | 298 000 | 263 000 | 300 000 | 0.98 |
| 407.00 | 264 000 | 341 000 | 300 000 | 343 000 | 0.97 |
| 473.00 | 301 000 | 390 000 | 345 000 | 392 000 | 0.96 |
| 545.00 | 340 000 | 440 000 | 390 000 | 445 000 | 0.95 |

Sur les sommes de ce tableau, on compte 1/10 pour les frais d'emballage, de pose et imprévus.

Le prix du kilogramme de métal brut est estimé :

0f,55 pour la fonte, 0f,60 pour le fer, 0f,70 pour la tôle et 3f,00 pour le cuivre.

Pour une machine de 50 chevaux à balancier, le prix du métal façonné sans le 1/10 de frais divers, est respectivement :

0f,80 3f,00 1f,00 5f,00.

Le tableau précédent donne des valeurs que l'on doit considérer comme des minimums souvent trop faibles.

**376.** *Poids des machines à vapeur.* Des recherches de M. Chabrol ont appris que le poids moyen des machines fabriquées en France, de 1800 à 1825, était de 1460 kilogrammes par force de cheval ; un seul constructeur avait pu le réduire à 1000 kilog. En 1844, dans les meil-

leures constructions, ce poids s'élevait à 700 ou 800 kilog., non compris une constante de 1500 à 2000 kilog. qui se reportait sur toute la machine. Pour les locomotives, marchant à leur maximum d'effet, ce poids, y compris le tender, n'excédait pas 500 kil. par force de cheval développée.

*TABLEAU des poids des métaux contenus dans les machines à balancier, sans détente ni condensation*, d'après MM. Bataille et Jullien.

| FORCES des machines en chevaux. | POIDS DE | | | | POIDS totaux. |
|---|---|---|---|---|---|
| | fonte. | fer. | tôle. | cuivre. | |
| | kil. | kil. | kil. | kil. | kil. |
| 1.2 | 400 | 40 | 240 | 9 | 689 |
| 2.0 | 755 | 77 | 400 | 16 | 1 248 |
| 3.2 | 1 260 | 132 | 640 | 26 | 2 058 |
| 4.7 | 1 955 | 208 | 940 | 40 | 3 143 |
| 6.6 | 2 825 | 310 | 1 320 | 58 | 4 513 |
| 9.0 | 3 900 | 436 | 1 800 | 80 | 6 216 |
| 12.0 | 5 200 | 595 | 2 400 | 107 | 8 302 |
| 15.6 | 6 710 | 790 | 3 120 | 138 | 10 758 |
| 19.8 | 8 500 | 1 020 | 3 960 | 175 | 13 655 |
| 24.8 | 10 500 | 1 280 | 4 960 | 215 | 16 955 |
| 30.6 | 12 800 | 1 590 | 6 120 | 264 | 20 774 |
| 37.0 | 15 400 | 1 950 | 7 400 | 317 | 25 067 |
| 44.8 | 18 200 | 2 350 | 8 960 | 375 | 29 885 |
| 54.0 | 21 341 | 2 917 | 10 000 | 438 | 34 696 |
| 63.2 | 24 900 | 3 320 | 12 640 | 510 | 41 370 |
| 74.6 | 28 600 | 3 870 | 14 920 | 590 | 47 980 |
| 87.0 | 32 600 | 4 465 | 17 400 | 670 | 55 135 |
| 111.0 | 42 400 | 5 950 | 22 200 | 870 | 71 420 |
| 138.5 | 53 800 | 7 650 | 27 700 | 1110 | 90 260 |
| 170.0 | 67 000 | 9 650 | 34 000 | 1370 | 112 020 |
| 207.0 | 82 000 | 12 000 | 41 400 | 1680 | 137 080 |
| 248.0 | 98 000 | 14 700 | 49 600 | 2040 | 164 340 |
| 295.0 | 118 000 | 17 600 | 59 000 | 2420 | 197 020 |
| 348.0 | 139 500 | 21 300 | 69 600 | 2850 | 233 250 |
| 407.0 | 161 500 | 24 850 | 81 400 | 3320 | 275 070 |
| 473.0 | 186 000 | 29 200 | 94 600 | 3820 | 313 620 |
| 545.0 | 214 000 | 33 800 | 109 000 | 4400 | 361 200 |

*TABLEAU des proportions des métaux entrant dans la construction des différents genres de machines.*

| MACHINES. | FONTE. | FER. | TÔLE. | CUIVRE. | TOTAL. |
|---|---|---|---|---|---|
| Sans détente ni condensation. . | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
| Sans détente, à condensation. . | 1.44 | 1.12 | 1.00 | 1.38 | 1.29 |
| A détente, sans condensation. . | 1.22 | 1.02 | 1.00 | 1.07 | 1.14 |
| A détente et condensation. . . . | 1.46 | 1.12 | 1.00 | 1.38 | 1.30 |

A l'aide de ces tableaux, on déterminera facilement les poids des différents métaux qui entrent dans une machine quelconque à balancier, et par suite le prix de la machine (375).

MM. Bataille et Jullien posent ce résultat remarquable, que le poids total des machines, par cheval, est à peu près constant, quelle que soit la puissance, et égal à

600 kilog. pour les machines sans détente ni condensation;
700 pour les machines à détente sans condensation;
800 pour les machines à condensation avec ou sans détente.

Pour les machines horizontales, ils donnent les poids moyens relatifs suivants :

| | fonte | fer et tôle | cuivre. |
|---|---|---|---|
| Machines à balancier | 1,00 | 1,00 | 1,00 |
| Machines horizontales | 1,10 | 0,84 | 0,82 |

**377.** *Modèle de traité à forfait pour la construction d'une machine à vapeur.*

Entre les soussignés :

M. A..., filateur à..., domicilié à..., et M. B..., constructeur de machines, domicilié à..., rue...,

A été convenu ce qui suit :

Art. 1er. M. B... s'engage à construire pour M. A..., qui l'accepte, une machine à vapeur avec son générateur, sa cheminée et tous les accessoires et agrès, le tout monté, mis en place et essayé avant la livraison. Cette machine, destinée à mouvoir la filature de M. A..., sera conforme au plan d'ensemble annexé au présent traité et remplira les conditions suivantes :

1° Sous la pression de 6 atmosphères accusée par le manomètre dans la chaudière et sous une detente commençant au quart de la course du piston, la machine devra donner au moins 100 chevaux de force, comptés au dynamomètre sur l'arbre de l'usine au point $x$ du plan ci-joint;

2° La machine donnera très-uniformément 36 tours d'arbre par minute sans secousses ni points morts sensibles;

3° La vapeur sortant du cylindre pourra être à volonté, ou bien déchargée dans l'atmosphère, ou bien conservée et employée dans l'usine;

4° Le générateur aura au moins 140 mètres carrés de surface de chauffe divisée en trois chaudières, dont chacune pourra être au besoin isolée des autres et vidée pour être nettoyée;

5° La machine et la chaudière seront installées d'une manière commode, avec toute facilité de visite et entretien, dans le bâtiment qui existe actuellement contre l'usine de M. A..., et que M. B... déclare connaître. Cette installation aura lieu de manière à ce qu'il n'en résulte aucunes secousses ni vibrations pour les bâtiments voisins et sans compromettre leur durée.

Art. 2. La consommation garantie sera par heure de ... kilogrammes de houille de qualité ordinaire. Le prix ci-après stipulé sera réduit de ... francs par 50 kilogrammes excédant par heure cette consommation, et augmenté au contraire de ... francs par 50 kilogrammes brûlés en moins de la consommation garantie.

Art. 3. Le constructeur garantit que l'appareil sera loyalement exécuté dans toutes ses parties avec des matériaux de bonne qualité sans cale ni pièces de remplissage, c'est-à-dire exempt de tout vice de construction, et qu'il fonctionnera pendant ... années, une ordinairement, sans autres réparations que celles provenant de l'usure habituelle et des avaries survenues par force majeure. Il s'engage en outre, pendant ... mois, à dater du commencement du service, à faire toutes les réparations nécessaires, sauf celles qui surviendraient par force majeure.

Art. 4. Les agents et ingénieurs de M. A... auront en outre toute liberté de suivre et surveiller l'exécution des travaux dans les usines du constructeur.

Art. 5. Les appareils ci-dessus seront mis en place et prêts à fonctionner le... sous peine de... francs par jour de retard, lesquels seront imputés sur le premier payement échu.

Art. 6. Le prix est fixé à forfait pour la machine et le générateur complets et en place, à la somme de ... francs, sans que les parties puissent prétendre aucune réduction ni augmentation, même pour les modifications que croirait devoir apporter le constructeur ou qui seraient consenties par lui. Le prix des fondations pour la machine, la cheminée, le générateur et tous les accessoires, ainsi que les réparations à effectuer aux bâtiments, sera payé suivant état, d'après les mémoires, sauf vérification s'il y a lieu.

Art. 7. Le prix ci-dessus sera payé à la caisse de... et sous la réserve de l'art. 2, savoir :

1/4 sur-le-champ, à titre d'arrhes;
1/4 à l'achèvement des travaux chez le constructeur,
1/4 à la mise en place complète dans l'usine,
1/4 après la garantie de ... mois.

Art. 8. En cas de contestations, elles seront jugées par le tribunal de commerce de... Pour la signification des actes et la réception de leur correspondance, les parties élisent domicile aux adresses ci-dessus, et elles conviennent que l'enregistrement des présentes sera à la charge de celui qui nécessitera cette mesure.

Fait double à ..., le ...

*Signatures des parties.*

Très-souvent la cheminée et le fourneau ne sont pas à la charge du mécanicien, qui fournit seulement la machine avec sa roue ou poulie de commande, et la chaudière munie de tous ses accessoires tels que robinets, tube indicateur du niveau, sifflet flotteur, soupapes de sûreté, manomètre et tuyauterie complète, en limitant à 3 mètres la longueur du tuyau d'échappement de la vapeur. Les accessoires du fourneau tels que grille, sommiers, plaques de fonte, portes..., sont à la charge de l'acquéreur, ou sont fournies par le constructeur à ... francs le kilogramme. Dans ce cas, on modifie en conséquence l'article 1^er^ du traité.

## BATEAUX A VAPEUR.

**378.** *Force d'impulsion.* La force nécessaire pour faire avancer un bateau dans une eau tranquille d'un espace indéfini est

$$F = k\frac{AV^2}{2g}.$$

F force qui sollicite le bateau dans la direction du mouvement, en unités de 1000 kilog. (34);
A maître-couple (plus grande section transversale de la partie plongée du bateau), en mètres carrés;
V vitesse du bateau, en mètres par seconde;
$k$ coefficient très-variable dépendant de la forme du bateau.

$k = 1,10$ quand le bateau est un prisme rectangulaire droit dont la longueur est égale à cinq ou six fois la largeur.

$k = 1$ quand la proue (avant du bateau) est disposée comme dans le cas précédent, et que la poupe (arrière du bateau) est formée de deux plans verticaux inclinés à 45° avec l'axe du bateau. Dans les applications aux bateaux ordinaires, on peut supposer,

sans crainte d'erreur sensible, que la diminution de $k$, due à la poupe, est égale à 1/10 environ de la valeur 1,10 qui convient au prisme.

Si les plans verticaux inclinés sont placés sur la proue du bateau prismatique, au lieu de l'être sur la poupe comme dans le cas précédent, les angles de ces plans avec l'axe du bateau étant successivement :

90°, 78°, 66°, 54°, 42°, 30°, 18°, 6°,

les valeurs respectives de $k$ sont :

1,10, 1,05, 0,93, 0,76, 0,60, 0,48, 0,46, 0,44.

En ajoutant une poupe, les valeurs précédentes de $k$ diminuent de 1/10 de 1.10, et elles deviennent respectivement :

1,00, 0,94, 0,82, 0,65, 0,49, 0,37, 0,35, 0,33.

Une proue cylindrique à axe vertical réduit la valeur 1,10 de $k$ à $1{,}10 \times \frac{13}{25} = 0{,}57$.

En ajoutant une poupe on a $k = 0{,}46$.

Si la proue est formée par les prolongements des faces latérales du prisme, et limitée en dessous par un plan incliné à 43° avec l'horizon, on a $k = 1{,}10 \times 0{,}55 = 0{,}605$ ; quand le plan est incliné à 25°26′ à l'horizon, on a $k = 1{,}10 \times 0{,}43 = 0{,}473$. En ajoutant une poupe on aurait donc respectivement, pour les deux proues précédentes, $k = 0{,}495$ et $k = 0{,}363$.

Pour les grands vaisseaux, on est arrivé à réduire $k$ à 0,22 ou 0,24.

Pour les bateaux à vapeur, avec les formes arrondies en tous sens qu'on leur donne, $k$ varie de 0,16 à 0,18 ; en Amérique on est même arrivé à avoir $k = 0{,}12$.

Dans des essais plus récents, il paraîtrait que l'on serait parvenu à réduire la valeur de $k$ à 0,05 et même à 0,045.

Les valeurs de $k$ augmentent quand le bateau se meut dans un espace limité, tel qu'un canal.

**379.** *Travail moteur absorbé par la marche d'un bateau en une seconde* Ce travail étant représenté par $\mathcal{T}_u$, on a

$$\mathcal{T}_u = \mathrm{FV} = k\,\frac{\mathrm{AV}^3}{2g}.$$

V espace parcouru par la puissance F en une seconde.

Les mêmes lettres ont les mêmes significations qu'au n° 378.

Cette formule fait voir que pour un temps donné le travail moteur dépensé est proportionnel au cube de la vitesse du bateau ; mais l'expérience prouve que ce n'est que pour des vitesses qui ne dépassent pas 4 mètres par seconde ; au-dessus de cette limite, des expériences prouvent que le travail croît dans un rapport inférieur à celui du cube de la vitesse, ou que la puissance F croît dans un rapport inférieur à celui du carré de la vitesse.

Pour un espace parcouru E, le travail dépensé par le moteur est

$$\mathcal{T}'_u = \mathrm{FE} = k\,\frac{\mathrm{AV}^2}{2g}\,\mathrm{E}.$$

Formule qui fait voir que, pour un même espace parcouru, le travail dépensé est proportionnel au carré de la vitesse du bateau.

380. *Impulsion au moyen de roues à palettes.* Représentant par F' la résistance que l'eau oppose au mouvement des palettes, on peut l'exprimer par une formule analogue à celle du n° 378; mais Coriolis, en supposant que toute l'eau est frappée par les palettes, et en tenant compte des bouillements, a posé la formule suivante, qui s'écarte moins de la pratique :

$$F' = k' \frac{aV}{2g} (v - V).$$

$a$ section des roues à palettes, ou plutôt surface d'une aube, s'il n'y a qu'une roue, et surface de deux aubes, s'il y a deux roues ;
V vitesse du bateau ;
$v$ vitesse de rotation du centre de gravité des palettes ;
$(v-V)$ vitesse avec laquelle les palettes frappent l'eau ;
$k'$ coefficient dont la valeur varie de 1 à 1,2, mais qui est ordinairement égal à 1,1.

Quand le mouvement du bateau est arrivé à l'uniformité, la résistance que l'eau oppose au mouvement des roues est égale à celle qu'elle oppose au mouvement du bateau; on a donc (378)

$$F = F' \quad \text{ou} \quad k \frac{AV^2}{2g} = k' \frac{aV}{2g} (v - V);$$

d'où l'on tire

$$V = \frac{k'av}{k'a + kA}, \quad \text{ou} \quad v = \frac{V(k'a + kA)}{k'a}. \qquad (1)$$

Formule qui fait voir que la vitesse V du bateau est proportionnelle à la vitesse de rotation $v$ des palettes, et que si la section $a$ des palettes est très-grande par rapport au maître-couple A, on a $V = v$; mais que dans le cas contraire, comme cela a toujours lieu dans la pratique, on a $V < v$.

381. *Travail moteur absorbé par seconde pour communiquer la vitesse relative aux palettes.* En représentant ce travail par $\mathcal{T}_p$, comme $v - V$ est l'espace parcouru par la résistance F' en une seconde, on a

$$\mathcal{T}_p = F'(v - V) = k' \frac{aV}{2g} (v - V)(v - V) = k' \frac{aV}{2g} (v - V)^2.$$

382. *Force de la machine d'un bateau recevant son impulsion au moyen de roues à palettes.* Le travail moteur $\mathcal{T}_m$ produit par la machine en une seconde est égal au travail $\mathcal{T}_u$ absorbé par la résistance que le bateau éprouve à avancer (379), et qui est le travail utile, plus le travail $\mathcal{T}_p$ absorbé par la résistance que les roues éprouvent à se mouvoir (381), et qui est le travail perdu; on a donc

$$\mathcal{T}_m = \mathcal{T}_u + \mathcal{T}_p = k \frac{AV^3}{2g} + k' \frac{aV}{2g} (v - V)^2,$$

ou, en remplaçant $v$ par sa valeur (1), n° 380, et en transformant,

$$\mathcal{T}_m = \frac{V^3}{2g}\, kA\left(1+\frac{kA}{k'a}\right).$$

Cette formule est d'accord avec la pratique et donne exactement la force de la machine pour des vitesses V qui ne dépassent pas 4 mètres par seconde; au-dessus de cette limite, la force de la machine est moindre que celle donnée par la formule.

383. *Rapport du travail utile au travail perdu.* Ce rapport est

$$\frac{\mathcal{T}_u}{\mathcal{T}_p} = \frac{FV}{F'(v-V)} = \frac{V}{(v-V)}. \qquad (379 \text{ et } 381)$$

Expression qui fait voir que ce rapport est d'autant plus grand que $v-V$ est plus petit, c'est-à-dire que la vitesse du bateau diffère moins de celle des palettes, et qu'il serait infini, c'est-à-dire que le travail perdu serait nul, si les palettes ne pénétraient pas dans l'eau; car alors on aurait $v-V=0$.

Ayant

$$F=F', \quad \text{ou} \quad k\frac{AV^2}{2g} = k'\frac{aV}{2g}(v-V), \qquad (380)$$

d'où l'on tire

$$\frac{V}{v-V} = \frac{k'a}{kA},$$

on a donc aussi

$$\frac{\mathcal{T}_u}{\mathcal{T}_p} = \frac{k'}{k} \times \frac{a}{A}.$$

Expression qui fait voir que le rapport du travail utile au travail perdu est d'autant plus grand, que la section $a$ des palettes est plus grande par rapport au maître-couple A.

Pour les bateaux voyageant sur mer, le rapport du maître-couple à la section des palettes varie, d'après M. Campaignac, de 4,5 à 7, suivant que la force de la machine varie de 12 à 220 chevaux, et il est moyennement de 6,75 pour les bateaux de 80 à 200 chevaux. Sur les cours d'eau, ce rapport varie ordinairement de 3,5 à 4, et il est encore moindre pour les petits bateaux de rivières.

Sur la haute Seine, le tirant d'eau des bateaux à vide, c'est-à-dire la profondeur à laquelle ils plongent, varie de $0^m,27$ à $0^m,30$; sur la Loire et la Moselle, il est de $0^m,22$ seulement. Pour les bateaux de 40 chevaux environ, le tirant d'eau varie de $0^m,40$ à $0^m,50$.

Supposant $a=1$, $A=4$, $k'=1$ et $k=0,17$, on a

$$\frac{\mathcal{T}_p}{\mathcal{T}_u} = \frac{4\times 0,17}{1\times 1} = 0,68, \quad \text{et} \quad \frac{\mathcal{T}_m}{\mathcal{T}_u} = \frac{1+0,68}{1} = 1,68.$$

Ce qui fait voir que le travail utile $T_u$ étant représenté par 1, le travail perdu $T_p$ l'est par 0.68, et le travail moteur $T_m$ par 1,68.

M. Colladon, dans des expériences faites à Genève, a trouvé que le travail perdu était les 0,33 du travail moteur pour un bateau, et les 0,31 pour un autre ; c'est un peu moins que ne l'indiquent les rapports précédents.

384. *Calcul de la force d'une machine de bateau.* Supposons que l'on a $V = 3^m,25$, $k = 0,17$, $k' = 1$ et $A = 4a$.

Remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule

$$T_m = \frac{V^3}{2g} kA \left(1 + \frac{kA}{k'a}\right), \qquad (382)$$

on a

$$T_m = \frac{34,33 \times 0,17}{19,62} \times A(1 + 0,68) = 0,5A.$$

Si l'on suppose $A = 1^{mc},00$, on aura $T_m = 0,5$ de grande unité dynamique, ou

$$T_m = \frac{0,500}{0,075} = 6,67 \text{ chevaux-vapeur.}$$

Ainsi, chaque mètre carré de section du maître-couple exigera 6,67 chevaux de force ; ce qui donne, pour un bateau de petite navigation, de 450 tonneaux et de 24 mètres carrés de maître-couple,

$$T_m = 6,67 \times 24 = 160 \text{ chevaux.}$$

Avant la construction des bateaux de 450 chevaux que fit exécuter le gouvernement français en 1845, on n'avait encore établi en France que des bateaux de 250 chevaux au maximum ; en 1851, on a construit le vaisseau à hélice le *Napoléon*, de 1000 chevaux et de 90 canons ; et en 1855, le vaisseau la *Bretagne*, de 130 canons et de la force de 1200 chevaux.

385. *Travail moteur nécessaire pour faire remonter ou descendre une rivière par un bateau.* L'expression de ce travail est analogue à celle donnée pour une eau tranquille (382) ; ainsi on a, quand le bateau remonte,

$$T_m = \frac{(V + u)^3}{2g} kA \left(1 + \frac{kA}{k'a}\right).$$

$u$ vitesse de l'eau par seconde ;

Les autres lettres ont les mêmes significations qu'aux nos 378 et 380 ;

$(V + u)$ vitesse relative du bateau par rapport à l'eau.

Quand le bateau descend, l'expression de ce travail devient

$$T_m = \frac{(V - u)^3}{2g} kA \left(1 + \frac{kA}{k'a}\right).$$

$(V - u)$ vitesse relative du bateau par rapport à l'eau.

386. *Bateau sur un canal.* Comme la section d'un canal est assez faible, l'espace occupé par le bateau la diminue sensiblement; ce qui augmente la vitesse relative de l'eau de chaque côté du bateau, et par suite le travail moteur (385). Afin que la vitesse du bateau ne soit pas diminuée par ce surcroît de vitesse relative, on augmente un peu la vitesse des roues à palettes.

387. *Impulsion au moyen des roues à hélices.* Toutes les formules posées aux n$^{os}$ 378 à 383 sont applicables aux bateaux à hélices; seulement, alors, la vitesse de rotation $v$ est la vitesse de l'hélice dans le sens du mouvement du bateau, c'est-à-dire la vitesse de rotation d'un point quelconque de la roue, multipliée par le rapport entre le pas de l'hélice et la circonférence décrite par ce point. $a$ est la surface de la base du cylindre circonscrit à l'hélice, moins la section de l'arbre; c'est $\pi R^2$, en négligeant cette section et en désignant par R le rayon du cylindre (395).

Les hélices sont complétement noyées, ce qui les rend avantageuses pour les bâtiments de guerre et dans les gros temps; on les place à l'arrière du bateau. Leur surface doit être lisse et leurs angles bien aigus; on les coule en bronze, et toute la roue d'une seule pièce.

388. *Exemples de grands bâtiments à vapeur.*

*Le Great-Western*, deuxième navire à vapeur qui, en 1838, a fait le voyage d'Angleterre en Amérique (de Bristol à New-York), est de la contenance de 1604 tonneaux; sa force est de 450 chevaux pour deux machines; ses quatre chaudières pèsent 180 tonneaux, et elles sont entourées d'une chambre contenant 900 tonnes de charbon, ce qui suffit pour vingt-cinq jours de marche. Tout l'appareil mécanique pèse 470 tonnes. Le tirant d'eau est de 5$^m$,38. La longueur du bateau est de 240 pieds, et la largeur de 58 pieds, y compris les roues, qui ont 38 pieds de diamètre. Le salon, richement décoré par Parris, a 82 pieds de long sur 34 pieds de large; il y a en outre d'autres pièces (chambres, chapelle, salle de conseil); le bateau porte 150 lits réservés aux passagers, et il reste encore un emplacement pour plus de 200 tonneaux de marchandises. La durée du trajet de Bristol à New-York est de 16 jours, et le retour est de 13 jours 1/2; la vitesse moyenne de marche est de 5,25 lieues à l'heure.

*La Victoria*, plus long de 35 pieds que le plus fort vaisseau de la marine royale, a 275 pieds de la poupe à la proue; sa force est de 500 chevaux; il est du port de 1863 tonneaux; il peut recevoir 500 passagers et 1000 tonnes de marchandises; sa construction a coûté 2 millions et demi.

*La reine de l'Est*, naviguant entre l'Angleterre et l'Inde, est du tonnage de 2618 tonneaux; son tirant d'eau n'est que de 15 pieds; sa force est de 600 chevaux; sa longueur, de tête en tête, est de 310 pieds et de 282 pieds sur le pont. La longueur de la principale chambre est

de 128 pieds. On y trouve seize chambres contenant 400 lits pour les passagers. Tout le reste est en proportion.

**389.** La consommation en charbon des machines de bateau est très-variable ; ainsi, elle s'élève à 5 et jusqu'à 10 kilog. de houille par force de cheval et par heure, pour les machines à basse pression sans détente ; tandis qu'on a construit des machines à moyenne pression et à détente ne brûlant que 4 kilog. de houille ; on est même arrivé à n'en brûler que $2^k,80$. D'après M. Campaignac, les forces en chevaux des bateaux étant successivement :

50 80 100 120 140 160 180 200 250 300 350 400 450 500,

le poids en kilogrammes du charbon brûlé par force de cheval et par heure est respectivement, pour des machines à basse pression à condensation détendant aux 7/10 de la course du piston, telles que les construisent MM. Maudslay et Field :

5,000 4,500 4,340 4,185 4,030 3,870 3,710 3,555 3,385 3,280 3,150 2,985 2,820 2,655.

et la surface de chauffe, en mètres carrés et par cheval :

1,200 1,080 1,040 1,000 0,965 0,925 0,890 0,850 0,810 0,785 0,755 0,715 0,675 0,630.

**390.** *Vitesse des bateaux à vapeur et des navires.* En Amérique, des bateaux ont atteint une vitesse de $6^m,65$ par seconde ; un bateau construit en Angleterre a encore donné une vitesse plus grande ; en France, on n'a guère dépassé 6 mètres. Aux vitesses qui approchent de ces limites, la force de la machine est considérable pour une très-faible charge ; aussi, la marche ordinaire sur un cours d'eau est-elle de 3 à 4 mètres par seconde. On estime qu'en mer, en faisant simultanément usage des voiles et de la vapeur, on peut moyennement accélérer la vitesse due à la vapeur de $0^m,50$ environ par seconde.

La vitesse d'un navire par rapport à la surface de la mer se mesure au moyen du *loch ;* instrument qui consiste dans un secteur en bois lesté avec du plomb qui le maintient perpendiculaire à la surface des eaux dans lesquelles il plonge ; à cette planche triangulaire est fixée une corde divisée par des nœuds espacés de 15 mètres, et par d'autres espacés de $1^m,50$. Le loch jeté à la mer reste en place, et le nombre de nœuds dont la ligne se déroule sur le bâtiment donne la vitesse, qui s'estime par le nombre des nœuds déroulés dans une demi-minute. Ainsi, dire qu'un navire file 10 nœuds, par exemple, cela signifie que sa vitesse est de $\frac{15 \times 10}{30} = 5$ mètres par seconde.

**391.** *Poids des machines de bateaux.* Sur rivières, ce poids varie de 1200 à 1400 kilog. par force de cheval, roues à palettes, chaudière et eau qu'elle contient comprises (le combustible n'est pas compris), pour les machines à basse pression sans détente. Pour les machines à haute et moyenne pression, ce poids n'est que de 800 kilog. (376).

Pour la même force, les machines sont plus légères sur rivières que sur mer.

*Poids des différentes parties des machines et chaudières de l'Érèbe* (Maudslay) *et du Sphinx* (Fawcett).

| DÉTAILS. | ÉRÈBE | | SPHINX. | |
|---|---|---|---|---|
| | pour 60 chevaux. | pour 1 cheval. | pour 160 chev. | pour 1 cheval. |
| | k. | k. | k. | k. |
| Organes des machines (cylindres à vapeur, tiroirs, appareils de condensation et d'alimentation, pompes d'épuisement, boulons d'assemblage, tuyaux d'alimentation, d'évacuation et de condensation). | 9528.10 | 158 80 | 34701 | 216.88 |
| Charpente des machines (toutes les parties fixes). | 4389.00 | 73.15 | 21 667 | 135.42 |
| Mécanisme proprement dit (toutes les parties mobiles, non compris les arbres de transmission et leurs manivelles). | 3921.50 | 65.36 | 13730 | 85.81 |
| Transmission de mouvement (arbre intermédiaire avec ses manivelles, arbres des roues avec tout ce qu'ils portent, roues à palettes). | 5354.10 | 89.23 | 28004 | 175.02 |
| Appareil évaporatoire (valves régulatrices, tuyau d'arrivée de vapeur, corps de chaudières, cheminée, foyers, soupapes, robinets, flotteurs, tuyaux d'évacuation des soupapes d'arrêt, prises d'eau, tuyaux pour remplir et vider les chaudières, pompe à bras, soutes à charbon en tôle). | 19318.00 | 321.97 | 56 828 | 355.17 |
| Accessoires (parquets, entourage ou garde-corps des machines, garniture pour trous-d'homme, cercle et haubans de cheminée, escalier pour descendre aux machines). | 1225.50 | 20.42 | 5747 | 35.92 |
| Total. | 43736.20 | 728.93 | 160 677 | 1004.23 |

*Poids total d'appareils à vapeur marins complets pour divers bâtiments.*

| NOMS DES BATIMENTS. | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Var. | Liamone. | Érèbe. | Marseillais. | Sphinx. | Tancrède. | Eurotas. | Pluton. |
| **NOMS DES CONSTRUCTEURS.** | | | | | | | |
| Fawcett. | Maudslay. | Maudslay. | Fawcett. | Fawcett. | Miller. | Maudslay. | Schneider. |
| **Forces des machines en chevaux.** | | | | | | | |
| 50 | 50 | 60 | 80 | 160 | 160 | 160 | 220 |
| **Poids total des machines et chaudières vides.** | | | | | | | |
| 48000k | 38000k | 43500k | 72000k | 160000k | 140000k | 128000k | 220000k |
| **Poids par force de cheval.** | | | | | | | |
| 960 | 760 | 725 | 900 | 1000 | 875 | 800 | 1000 |

**392.** *Proportions des bateaux* (388). Sur rivières, la longueur des bateaux doit être aussi grande que possible, afin de diminuer le maître-couple ; ordinairement, elle est égale à onze ou douze fois la largeur. Le rapport de la longueur à la largeur mesurées à la flottaison varie de 3 2/3 à 3 3/4 pour les vaisseaux et frégates à voiles ; il est de 6 à 7 pour les galères, et il paraît convenable de faire varier ce rapport entre 5 et 6 pour les bâtiments à vapeur.

La distance des roues à palettes à l'avant du bateau est ordinairement égale aux 2/5 de la longueur totale du bateau ; cependant, en Angleterre, dans beaucoup de bateaux, les roues sont placées au milieu de la longueur, et dans quelques bateaux il n'y a qu'une roue placée tout à fait à l'arrière.

On vient de remplacer avec succès les roues à palettes par la roue à hélice, imaginée par M. Sauvage (387).

Il n'y a pas de règle fixe pour déterminer le diamètre des roues à palettes ; on le prend le plus grand possible, en le combinant avec la vitesse de la machine, et de manière que le centre des palettes ait la vitesse calculée convenable pour imprimer le mouvement voulu au bateau. En Angleterre et en France, il est ordinairement égal à quatre fois la course du piston ; en Amérique, la course du piston est plus grande et le rapport du diamètre des roues à cette course est moindre.

Les palettes sont noyées de $0^m,06$ à $0^m,10$ dans l'eau, et leur nombre est tel, qu'une palette plongeant verticalement, la palette qui la pré-

cède sort de l'eau et celle qui lui succède y entre; cependant, afin d'éviter les secousses, le nombre des palettes dépasse celui qu'exigerait cette condition. En mer, l'écartement des palettes, mesuré sur la circonférence extérieure, varie généralement de $0^m,91$ à $1^m,22$.

*TABLEAU des dimensions des principales parties des bateaux à vapeur de la compagnie des Aigles, construits à la Seyne, près Toulon.* (Machines de MM. Miller et Ravenhill, de Londres.)

| NOM DU BATEAU. | Aigle-de-la-Mer. | Aigle-du-Rhône. | Aigle-du-Rhône. | Aigle-de-la-Saône. |
|---|---|---|---|---|
| DESTINATION. | Marseille et Arles. | Arles et Lyon. | Arles et Lyon. | Lyon et Châlons. |
| FORCE en chevaux pour les deux machines. | 80 | 80 | 56 | 40 |
| Longueur totale sur le pont. | $51^m.814$ | $60^m.958$ | $60^m.958$ | $51^m.814$ |
| Largeur de dehors en dehors. | 6 .096 | 6 .096 | 5 .486 | 4 .877 |
| Hauteur du pont au-dessus de la plate-forme inférieure du navire. | 3 .048 | 2 .616 | 2 .235 | 2 .235 |
| Tirant d'eau. Lège (avec machines et charbon). | 0 .610 | 0 .508 | 0 .406 | 0 .456 |
| Tirant d'eau. En charge (avec passagers ou marchandises). | 1 .219 | 0 .660 | 0 .610 | 0 .533 |
| Diamètre des cylindres à vapeur. | 0 .940 | 0 .940 | 0 .80 | 0 .711 |
| Course des pistons. | 0 .914 | 0 .914 | 0 .762 | 0 .610 |
| Pression absolue de la vapeur dans la chaudière, en atmosphères. | 1 .333 | 1 .455 | 1 .455 | 1 .455 |
| Nombre de coups de piston par minute, à la vitesse de régime. | 30 | 30 | 34 | 40 |
| Diamètre des roues en dehors des aubes. | $4^m.572$ | $4^m.267$ | $4^m.115$ | $3^m.810$ |
| Longueur des aubes. | 2 .133 | 2 .286 | 2 .057 | 1 .829 |
| Hauteur ou largeur des aubes. | 0 .457 | 0 .406 | 0 .381 | 0 .279 |
| Nombre d'aubes. | 14 | 14 | 12 | 12 |

*Bateaux transatlantiques construits aux États-Unis et faisant le service du Havre à New-York.*

| | Franklin. | Humboldt. |
|---|---|---|
| Longueur. | $75^m,00$ | $84^m,00$ |
| Largeur. | $12^m,00$ | $12^m,00$ |
| Bordée. | $7^m,80$ | $8^m,40$ |
| Tonnage. | $1900^t,00$ | $2200^t,00$ |
| Puissance des doubles machines à balancier. | $780^{ch},00$ | $800^{ch},00$ |
| Diamètre des cylindres à vapeur. | $2^m,80$ | $2^m,86$ |
| Course des pistons. | $2^m,40$ | $2^m,70$ |
| Diamètre des roues. | » | $10^m,80$ |

**393.** *TABLEAU des dimensions des principales parties des machines de quelques bâtiments à vapeur à roues.*
(Extrait de l'ouvrage de M. Campaignac.)

| NOM DU BATIMENT. | | Érèbe. | Marseillais. | Eurotas. | Sphinx. | Tancrède. | Véloce. | Corresp. d'Alexand. | Transatlantique |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| DESTINATION DU BATIMENT. | | Marine impériale. | Marseille à Agde. | Postes impériales. | Marine impériale. | Postes impériales. | Marine impériale. | Postes impériales. | Marine impériale. |
| NOM DU CONSTRUCTEUR, ou système de construction de l'appareil. | | Maudslay. | Fawcett. | Maudslay. | Fawcett. | Miller. | Fawcett. | Miller. | Schneider. |
| Force en chevaux pour les deux machines. | | 60 | 80 | 160 | 160 | 160 | 220 | 220 | 450 |
| Cylindres à vapeur. | Diamètre des pistons | 0m.846 | 0m.914 | 1m.224 | 1m.224 | 1m.224 | 1m.234 | 1m 430 | 1m.930 |
| | Course des pistons | 0 .914 | 1 .067 | 1 .372 | 1 .448 | 1 .372 | 1 .676 | 1 .500 | 2 .280 |
| | Chemin parcouru pendant l'introduction de la vapeur | 0 .690 | 0 .774 | 0 .960 | 1 .303 | 0 .995 | 1 .257 | 1 .087 | 2 .052 |
| Pompes à air. | Diamètre des pistons | 0 .460 | 0 .510 | 0 .710 | 0 .715 | 0 .674 | 0 .843 | 0 .783 | 1 .150 |
| | Course des pistons | 0 .457 | 0 .533 | 0 .686 | 0 .724 | 0 .686 | 0 .838 | 0 .750 | 1 .140 |
| Pompes alimentaires. | Diamètre des pistons | 0 .089 | 0 .088 | 0 .145 | 0 .140 | 0 .133 | 0 .152 | 0 .154 | 0 .200 |
| | Course des pistons | 0 .457 | 0 .533 | 0 .686 | 0 .724 | 0 .686 | 0 .838 | 0 .750 | 1 .140 |
| | Eau que peut fournir chaque pompe à la marche normale (en litres), par heure | 5453 | 5284 | 15848 | 14705 | 13343 | 18248 | 18444 | 35098 |
| | Nombre de coups de pistons par minute à la marche normale. | 32 | 27 1/7 | 23 1/3 | 22 | 23 1/3 | 20 | 22 | 16 1/3 |
| Diamètre de l'ouverture donnant entrée à la vapeur dans l'enveloppe du cylindre, ou dans la boîte à soupape d'expansion variable pour les 450. | | 0m.171 | » | 0m.250 | 0m.220 | 0m.268 | 0m.260 | 0m.311 | 0m.380 |
| Course des tiroirs. | | 0 .166 | 0m.144 | 0 .280 | 0 .203 | 0 .224 | 0 .250 | 0 .244 | 0 .320 |
| Ouverture donnant entrée à la vapeur dans la boîte à tiroirs. | Longueur. | 0 .275 | diamèt. | 0 .510 | 0 .380 | 0 .455 | diamèt. | 0 .529 | 0 .560 |
| | Largeur. | 0 .100 | 0m.180 | 0 .155 | 0 .125 | 0 .128 | 0m.260 | 0 .149 | 0 .200 |
| Ouverture donnant entrée à la vapeur dessus et dessous le piston. | Longueur. | 0 .295 | 0 .330 | 0 .470 | 0 .380 | 0 .455 | 0 .510 | 0 .570 | 0 .800 |
| | Largeur. | 0 .065 | 0 .071 | 0 .103 | 0 .097 | 0 .0885 | 0 .120 | 0 .097 | 0 .160 |
| Diamètre des soupapes de sûreté (à l'exception du 450 qui a deux soupapes par machine, les autres n'en ont qu'une par machine). | | 0m.140 | 0m.130 | 0m.230 | 0m.156 | 0m.156 | 0m.203 | 0m.190 | 0m.200 |
| Diamètre des roues. | A l'extérieur des cercles qui unissent les rayons. | 3 .790 | 4 .579 | 5 .961 | 6 .093 | 6 .040 | 6 .885 | 6 .600 | 9 .260 |
| | A l'extérieur des pales. | 3 .657 | 4 .419 | 5 .791 | 5 .943 | 5 .844 | 6 .705 | 6 .400 | 9 .000 |
| | A l'intérieur *id.* | 2 .857 | 3 .505 | 4 .571 | 4 .623 | 4 .614 | 5 .485 | 5 .000 | 7 .600 |
| Pales des roues. | Nombre pour chaque roue. | 10 | 13 | 14 | 16 | 18 | 20 | 18 | 24 |
| | Longueur des pales. | 1m.830 | 1m.981 | 2m.438 | 2m.438 | 2m.660 | 2m.743 | 2m.700 | 3m.000 |
| | Largeur *id.* | 0 .400 | 0 .457 | 0 .610 | 0 .660 | 0 .615 | 0 .610 | 0 .700 | 0 .800 |
| | Surface de chaque pale. | 0 .732 | 0 .905 | 1 .487 | 1 .609 | 1 .636 | 1 .673 | 1m.890 | 2 .400 |

**394.** *TABLEAU des dimensions principales de quelques bateaux à vapeur à roues pour rivières* (extrait du *Traité des machines à vapeur* de M. Gaudry).

| NOMS DES BATEAUX. | LIGNE ET SERVICE. | ANNÉE de la construction. | CONSTRUCTEURS | FORCE | | COQUE. | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | nominale. | réelle. | Longueur. | Largeur. | Creux. | Tirant d'eau maximum en charge. | Section immergée. | Vitesse en kilomètres. |
| | | | | chev. | chev. | mèt. | mèt. | mèt. | mèt. | m. car. | kilom. |
| Clémence-Isaure. . . | Garonne. . . . . | » | Jollet. . . . . | 24 | » | 36.00 | 3.00 | » | 0.50 | 1.50 | 17.00 |
| Parisien, n° 1. . . . | Haute-Seine. . . . . | 1835 | Cochot père. . . . . | 25 | » | 30.00 | 3.30 | 2 00 | 0.50 | 1.65 | 12.00 |
| Parisien, n° 2. . . . | Saône. . . . . | 1846 | Cochot frères. . . . . | 120 | » | 67.00 | 4.00 | 2.25 | 0.80 | 3.20 | 19.00 |
| Parisien, n° 4. . . . | Rhône. . . . . | 1851 | *Id.* . . . . . | 240 | » | 80.00 | 4.15 | 2.25 | 0.80 | 3.32 | 16.00 |
| Papin, n° 9. . . . . | *Id.* . . . . . | 1852 | Salmon. . . . . | 125 | » | 80.00 | 4.00 | » | 0.70 | 2.80 | 18.00 |
| Avant-Garde, n° 3. . | Saône. . . . . | 1851 | Arnaud. . . . . | 60 | » | 64.00 | 4.20 | » | 0.70 | 2.90 | 16.00 |
| Avant-Garde, n° 6. . | *Id.* . . . . . | 1852 | *Id.* . . . . . | 200 | » | 80.00 | 4.00 | » | 0.80 | 3.20 | 20.00 |
| Hirondelle, n° 6. . . | *Id.* . . . . . | 1843 | Jackson. . . . . | 60 | » | 60.00 | 5.00 | » | 0.70 | 3.50 | 16.00 |
| Le Neptune. . . . . | Seine. . . . . | 1853 | Normand et Baudu. . . | 150 | » | 70.00 | 4.40 | 2.10 | 1.20 | 4.75 | 19.00 |
| Le Napoléon. . . . . | *Id.* . . . . . | 1851 | Cavé. . . . . | 120 | 148 | 70.00 | 4.00 | » | 0.80 | » | » |
| Le Belot. . . . . | Saône. . . . . | 1854 | Corady. . . . . | » | 194 | 80.00 | 4.25 | » | 0.80 | » | 20 rem. |
| Express. . . . . | Rhône (voyag.). . . . . | 1853 | Carsenac. . . . . | 450 | 450 | 82.00 | 4.50 | 2.30 | 0.85 | 3.00 | 22 rem. |
| Ebro. . . . . | Ebre (voyag.). . . . . | 1855 | Creuzot. . . . . | 80 | » | 49.00 | 4.80 | 2.30 | » | » | » |
| Le Mogador. . . . . | Rhône. . . . . | 1852 | Oullins. . . . . | 80 | » | 100.00 | 5.00 | » | 0.90 | 4.5 | » |
| Papin, n° 6. . . . . | *Id.* (march.). . . . . | 1854 | Creusot. . . . . | 260 | » | 143.00 | 6.50 | 2.70 | 2.00 | 11.70 | 8.00 |
| Citizen. . . . . | Omnibus de la Tamise | 1843 | Penn. . . . . | 24 | » | 22.50 | 3.00 | » | » | » | rapide. |
| Waterman. . . . . | dans Londres. . . . . | 1843 | *Id.* . . . . . | 32 | 46 | 30.40 | 3.15 | 2.00 | 0.90 | 2.80 | *id.* |
| Le Castor. . . . . | Du Havre à Honfleur et | 1851 | Nillus. . . . . | 25 | 75 | 25.00 | 4.00 | » | 1.00 | 4.00 | 10 nœuds. |
| Le Chamois. . . . . | Trouville. . . . . | 1851 | *Id.* . . . . . | 50 | 156 | 32.00 | 4.40 | 2.40 | 1.35 | 5.00 | 22.00 |
| Saint-George. . . . . | Remorqueur. . . . . | 1856 | Cavé. . . . . | 70 | » | 48.00 | 4.40 | 2.40 | 0.62 | » | » |
| Monorome. . . . . | Navigation des canaux. . | 1854 | *Id.* . . . . . | 50 | 102 | 48.00 | 6.30 | 1.80 | 1.20 | » | 9.00 |

*Suite du tableau précédent.*

| NOMS DES BATEAUX. | ROUES. | | | | | VAPEUR. | | PISTONS. | | | DIMENSIONS DE LA MACHINE. | | | | SYSTÈME DE LA MACHINE. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Diamètre. | Nombre de tours par minute. | Nombre d'aubes. | Longueur des aubes. | Hauteur des aubes. | Pression. | Détente. | Nombre. | Diamètre. | Course. | Longueur. | Largeur. | Hauteur. | Surface de chauffe par cheval nominal. | |
| | m. | | | m. | m. | atm. | | | m. | m. | m. | m. | m. | m. | |
| Clémence-Isaure. . . | 2.90 | 42 | 12 | 1.65 | 0.35 | 6.0 | » | 2 | 0.250 | 0.50 | » | » | » | 0.80 | Oscillante. |
| Parisien, n° 1. . . . | 3.30 | 38 | 12 | 2.00 | 0.40 | 3.5 | 0.5 | 1 | 0.53 | 1.20 | 2.5 | 1.00 | 1.60 | 1.20 | Watt. A balanciers latéraux. |
| Parisien, n° 2. . . . | 4.85 | 34 | 14 | 2.60 | 0.45 | 1.5 | 0.6 | 2 | 1.25 | 1.00 | 5.00 | 3.00 | 2.40 | 1.20 | Directe inclinée, cyl. fixes. |
| Parisien, n° 4. . . . | 5.00 | 34 | 14 | 3.00 | 0.60 | 1.5 | 0.7 | 2 | 1.45 | 1.20 | 5.00 | 3.50 | 2.70 | 1.20 | *Id.* |
| Papin, n° 9. . . . . | 4.90 | 36 | 14 | 2.60 | 0.50 | 4.0 | 0.3 | 2 | 0.86 | 0.91 | 4.80 | 2.70 | 2.40 | 1.05 | Horizontale du Creuzot. |
| Avant-Garde, n° 3.. | » | 31 | » | » | » | 3.0 | » | 2 | 0.61 | 0.80 | 2.00 | 3.00 | 2.00 | » | Jackson. A balanciers latéraux. |
| Avant-Garde, n° 6.. | 4.74 | 36 | 16 | 3.00 | 0.60 | 6.0 | » | 2 | 0.77 | 1.00 | 4.90 | 2.70 | 2.40 | 0.65 | Horizontale du Creuzot. |
| Hirondelle, n° 6.. . | 4.74 | 32 | 14 | 2.00 | 0.40 | 3.5 | 0.4<br>0.6 | 2 | 0.65 | 0.83 | 2.80 | 2.40 | 1.90 | 1.30 | Jackson. A balanciers latéraux. |
| Le Neptune. . . . . | 4.80 | 36 | 12 | 2.00 | 0.70 | 7.0 | 0.33 | 2 | 0.70 | 0.80 | » | » | » | 0.83 | Oscillante vis-à-vis (Cavé). |
| Le Napoléon. . . . . | 4.20 | 36 | 12 | 2.00 | 0.50 | 6.0 | 0.4 | 2 | 0.56 | 1.36 | » | » | » | 0.81 | *Id.* côte à côte (Cavé). |
| Le Belot. . . . . | 5.00 | 33 | 14 | 3.20 | 0.40 | 4.0 | 0.47 | 2 | 0.96 | 0.96 | » | » | » | 1.15 | Horizontale du Creuzot. |
| Express. . . . . | 5.50 | 35 | 14 | 3.50 | 0.40 | 5.0 | 0.25 | 2 | 1.20 | 1.20 | 9.00 | 3.00 | 3.00 | 0.50 | *Id.* |
| Ebro. . . . . | » | 36 | 16 | » | 0.45 | 5.0 | 0.25 | 2 | 0.86 | 1.00 | 6.50 | 2.50 | 3.00 | 1.17 | *Id.* |
| Le Mogador. . . . . | 4.80 | 30 | 12 | 2.00 | 0.50 | 3.0 | » | 2 | 0.83 | 1.00 | » | » | » | » | Jackson. A balanciers latéraux. |
| Papin, n° 6. . . . . | 6.00 | 28 | 14 | 4.00 | 0 60 | 3.5 | 0.25 | 1 | 1.90 | 2.25 | 12.00 | 2.50 | 3.50 | 0.87 | Horizontale du Creuzot. |
| Citizen. . . . . | 3.04 | 40 | » | 1.38 | 0.25 | 3.0 | » | 2 | » | » | 2.00 | 2.20 | 1.70 | » | Oscillante de Penn. |
| Waterman. . . . . | 3.30 | 46 | » | 1.82 | 0.305 | 3.0 | » | 2 | 0.61 | 0.675 | 1.20 | 2.30 | 1.70 | » | *Id.* |
| Le Castor. . . . . | 3.00 | 40 | 12 | 1.30 | 0.40 | 2.5 | 0.6 | 2 | 0.55 | 0.56 | 1.00 | 2.20 | 1.60 | 1.60 | *Id.* |
| Le Chamois. . . . . | 3.70 | 42 | 11 | 1.34 | 0.51 | 2.5 | 0.6 | 2 | 0.735 | 0.76 | 1.00 | » | » | 1.60 | *Id.* |
| Saint-George. . . . . | 4.24 | 30 | 16 | 2.15 | 0 45 | 5.0 | 0.5 | 2 | 0.585 | 1.33 | 6.00 | 2.45 | 3.00 | 1.35 | Oscillante de Cavé. Cyl. vis-à-vis. |
| Monorome. . . . . | 3.80 | 28 | 8 | 2.40 | 0.50 | 5.5 | 0.6 | 2 | 0.50 | 1.00 | » | » | » | 1.21 | Oscillante horizontale de Cavé. |

**393.** *TABLEAU des dimensions principales de quelques bâtiments de guerre à hélice récemment construits* (extrait du *Traité des machines à vapeur* de M. Gaudry).

| NOMS DES NAVIRES. | SERVICE. | ANNÉE de la construction. | CONSTRUCTEURS. | | FORCE | | COQUE. | | | | | TIRANT D'EAU | | | Section immergée. | Sillage. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | COQUE. | MACHINE. | nominale. | réelle. | Longueur. | Largeur. | Creux. | Déplacement. | Tonnage. | avant. | arrière. | moyen. | | |
| | | | | | chev. | chev. | mèt. | mèt. | mèt. | tonn. | tonn. | mèt. | mèt. | mèt. | mèt. c. | mèt. |
| Encounter. . . . | Frégate anglaise. . . | 1849 | Fincham. . . . . | Penn. . . . . | 360 | 643 | 57.7 | 10.10 | 6 00 | 552 | » | » | » | 3.85 | 34.33 | 10.25 |
| Arrogant. . . . | *Id.* . . . . . | 1849 | *Id.* . . . . . | *Id.* . . . . . | 360 | 623 | 60.4 | 13.90 | 6.00 | 1872 | » | » | » | 5.69 | 62.36 | 8.6 |
| Niger. . . . . | *Id.* . . . . . | 1849 | Lang. . . . . | Maudslay. . . . | 400 | 919 | 58.3 | 10.6 | » | 1672 | » | » | » | 4.35 | 35.00 | 10.42 |
| Termagant . . . | Frégate de 24, angl. | 1849 | Whit. . . . . | Sceaward. . . . | 620 | 1351 | 63.00 | 14.00 | 7.60 | 1550 | » | 4.8 | 5.4 | 5.12 | 53.85 | 9.51 |
| San-Jacinto. . . | Vaisseau américain. . | 1847 | » | » | » | 375 | 65 50 | 11.60 | 7.17 | 2200 | » | 4.75 | 4 80 | » | » | 9.55 |
| Flibany. . . . . | Vaisseau russe. . . . | » | » | Napier. . . . . | 450 | » | 64.20 | 15.45 | 8 47 | » | 2585 | » | » | 6.60 | 81.71 | » |
| Bretagne. . . . | Vaiss. franç. de 130. | 1855 | Cherbourg. . . . | Indret. . . . . | 1200 | » | 84.00 | 18 80 | 8.35 | 6466 | » | » | » | » | » | 14.00 |
| Napoléon. . . . | Vaisseau de 90. . . . | 1851 | Dupuy-de-Lôme. | *Id.* . . . . . | 950 | 1300 | 73.25 | 16.80 | » | » | 5051 | » | » | 7.83 | 98.00 | 12.00 |
| Charlemagne. . . | Vaisseau mixte. . . . | 1851 | Toulon. . . . . | Benett. . . . . | 450 | 630 | 59.8 | 16.24 | » | » | » | » | » | 7.40 | 92.00 | 9.5 |
| Wagram . . . . | Vaisseau français. . . | 1854 | » | Creuzot. . . . . | 650 | » | » | » | » | » | » | » | » | » | » | » |
| Eylau. . . . . | *Id.* . . . . . | 1855 | Toulon. . . . . | Cavé. . . . . | 900 | » | 60.00 | 17.00 | 11.5 | » | » | » | » | 7.30 | » | » |
| Primauguet . . . | Corvette française. . | 1832 | » | Mazeline. . . . | 400 | » | 55.00 | 11.00 | 8.0 | » | » | 4.50 | 5 20 | 4.85 | 53.00 | » |
| Roland. . . . . | Frégate française . . | 1852 | Toulon. . . . . | *Id.* . . . . . | 400 | » | 53.00 | 10.4 | » | » | 1300 | » | » | 4.58 | 37.6 | 12.00 |
| Tourville. . . . | Vaisseau mixte franç. | 1854 | » | *Id.* . . . . . | 650 | » | » | » | » | » | » | » | » | » | » | » |
| Isly. . . . . | Frégate française. . . | 1854 | Toulon. . . . . | Cavé. . . . . | 650 | » | » | 12.85 | 8.35 | » | » | » | » | 5.30 | » | » |
| Pomone. . . . . | Frégate de 46, franç. | 1845 | » | Mazeline. . . . | 220 | » | 52.00 | 13.00 | 6.70 | » | 1925 | » | » | 5.85 | » | » |
| Caton. . . . . | Frégate française. . . | 1848 | » | Creuzot. . . . . | 260 | » | 54.00 | 9.25 | 5.55 | » | 900 | » | » | 5.57 | 22.28 | » |
| Pélican. . . . . | Aviso français. . . . | » | » | » | 120 | » | 40 00 | 7.00 | 3.86 | » | 255 | » | » | 2.56 | 9.97 | » |
| Chaptal. . . . . | Corvette française. . | 1847 | Cavé. . . . . | Cavé. . . . . | 220 | 340 | 54.00 | 9.33 | 6.8 | » | 1060 | » | » | 3.60 | 24.00 | 11.00 |
| Biche. . . . . | Aviso français. . . . | 1843 | » | Mazeline. . . . | 120 | 164 | » | » | » | » | » | 3.30 | 4.35 | 3.81 | 21.00 | 8.00 |
| *Id.* (nouv. mach. | *Id.* . . . . . | 1854 | » | Sochet et Cavé. | 200 | » | » | » | » | » | » | 3.30 | 4.35 | 3.81 | 21.00 | » |
| L'Eclair. . . . . | Canonn. (4 c. de 50). | 1855 | Toulon. . . . . | Creuzot. . . . . | 110 | » | 42.00 | 7.20 | 2.70 | » | » | 2.20 | 2.50 | » | 15.20 | 7.00 |
| ***. . . . . | Canonnière. . . . . | 1855 | *Id.* . . . . . | Bourdon. . . . | 100 | » | 30 00 | 6.30 | 2.60 | » | » | » | » | 1.05 | 9.30 | » |
| Poudre. . . . . | *Id.* . . . . . | 1855 | Nantes. . . . . | Cavé. . . . . | 100 | » | 33.00 | 6.66 | 2.60 | » | » | 2.00 | 2.00 | » | » | » |

*Suite du tableau précédent.*

| NOMS DES NAVIRES. | HÉLICE. | | | | VAPEUR. | | PISTONS. | | | | DIMENSIONS DE LA MACHINE. | | | | | SYSTÈME DE LA MACHINE. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Diamètre. | Pas. | Nombre de tours par minute. | Système. | Pression. | Détente. | Nombre. | Diamètre. | Course. | Nombre de tours. | Surface de chauffe. | Longueur. | Largeur. | Hauteur. | Poids. | |
| | m. | m. | | ailes. | atm. | | | mèt. | mèt. | | m. c. | mèt. | mèt. | mèt. | tonn. | |
| Encounter. . . . . | 3.65 | 4.50 | 80 | 2 | 1.00 | 0.75 | 2 | 1.40 | 0.68 | 80 | » | » | » | » | » | Trunk-engine. |
| Arrogant. . . . . | 4.57 | 4.50 | 60 | 2 | 1.00 | 0.75 | 2 | 1.40 | 0.91 | 60 | » | » | » | » | » | *Id.* |
| Niger. . . . . | 3.64 | 5.1 | 75 | » | 1.7 | » | 4 | 0.94 | 0.45 | 75 | » | » | » | » | » | Horiz directe. |
| Termagant. . . . | 4.65 | 5.40 | 70 | » | 1.5 | » | 4 | 1.24 | 1.06 | 36 | » | » | » | » | » | Horiz., engrenage 2 à 1. |
| San-Jacinto. . . . | 4.42 | 9.89 | » | 6 | basse | » | 2 | 1.56 | 1.27 | 31 | 476 | » | » | » | » | Cyl. fixes inclin., avec engren. |
| Flibany. . . . . | » | » | » | » | basse | » | 2 | 1.80 | 0.76 | » | » | » | » | » | » | » |
| Bretagne. . . . | 6.30 | » | » | » | » | » | » | » | » | » | » | » | » | » | » | » |
| Napoléon. . . . . | 5.80 | 9.38 | 52 | 4 | basse | 0.8 | 2 | 2.42 | 1.63 | 25 | » | 40 | 10.00 | » | 950[a] | Hor., engr. 2 à 1. |
| Charlemagne. . . | 5.00 | 7.00 | 52 | 2 | 1.0 | 0.7 | 4 | 1.30 | 1.00 | 52 | » | » | » | » | » | Direction horizontale. |
| Wagram. . . . . | » | » | 46 | » | 2.5 | 0.3 | 4 | 1.44 | 1.20 | 46 | 940 | 9.50 | 6.20 | 4.8 | » | Horiz. directe. |
| Eylau. . . . . | 5.40 | 8.90 | 50 | 5 | 2.5 | 0.7 | 4 | 1.65 | 1.00 | 60 | 1444 | 6.40 | 10.00 | 4.40 | 660[a] | *Id.* |
| Primauguet. . . . | 4.00 | 9.00 | 52 | 5 | 3.0 | 0.3 | 4 | 1.20 | 0.89 | 52 | 380 | » | 9.00 | 3.00 | 200 | Horiz., bielles en retour. |
| Roland. . . . . | 3.71 | 5.43 | » | 4 | basse | 0.7 | 4 | 1.20 | 1.00 | 42 | 387 | » | » | » | » | Horiz., dos à dos, engr. |
| Tourville. . . . . | » | » | 45 | 5 | 3.0 | » | 4 | 1.45 | 1.20 | 45 | 440 | 6.00 | 7.00 | 3.00 | » | Horiz., bielles en retour. |
| Isly. . . . . | 4.80 | 8.00 | 55 | 4 | 2.5 | 0.8 | 4 | 1.56 | 0.80 | 55 | 987 | 5.20 | 7.62 | 4.40 | 120 | Horiz. directe. |
| Pomone. . . . . | » | » | » | » | » | » | 2 | 1.17 | 1.17 | 38 | » | » | » | » | » | Syst. Holm., horiz. |
| Caton. . . . . | » | » | » | » | » | » | » | 1.12 | 1.40 | » | » | » | » | » | » | » |
| Pélican. . . . . | » | » | » | » | 1.53 | » | » | 1.12 | 0.96 | 30 | » | » | » | » | 80 | Oscillante. Penn. |
| Chaptal . . . . . | 3.20 | 6.40 | 70 | 4 | 1.00 | 0.7 | 4 | 1.00 | 0.70 | 70 | » | 6.40 | 5.8 | 3.00 | » | Horiz , bielles en retour. |
| Biche. . . . . | 3.00 | » | 82 | 2 | 2.00 | 0.5 | 2 | 0.95 | 0.915 | 54 | 126 | 3 00 | 8.00 | 3.00 | 63 | Horiz., dos à dos, engr. |
| *Id.* (nouv mach.). | » | » | 120 | » | 10.00 | 0.1 | » | 0.45 | 0.70 | 120 | » | 2.20 | 5.40 | 3.00 | » | Cyl. fixes incl. vis à-vis. |
| L'Éclair. . . . . | 1.86 | 2.45 | 140 | 4 | 5.00 | 0.2 | » | 0.45 | 0.50 | 140 | 196 | 2.50 | 2.60 | 0.80 | » | Mouv. de locomotives. |
| ***. . . . . | 1.00 | 1.25 | 225 | 4(s. 0.40) | 4.00 | » | 2 | 0.22 | 0.26 | 225 | 30 | 0 60 | 1.40 | 1.40 | » | *Id.* |
| Poudre. . . . . | 1.83 | 2.20 | 160 | 2 | 5.00 | » | 2 | 0.44 | 0.40 | 160 | 106 | 1.81 | 2.02 | 0.62 | » | *Id.* |

[a] Tout compris en ordre de marche.

**396.** *TABLEAU des dimensions des parties principales des machines pour la navigation à vapeur*, de MM. Maudslay et Field, extrait de l'*Artizan-Club* (366).

| DÉSIGNATION DES DIVERSES PARTIES. | Puissance nominale en chevaux-vapeur. | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 |
| *Diamètre :* | centim. | centim. | centim. | centim. | centim | centim. | centim. | centim. | centim. | centim. | centim. | centim. | centim. | centim. |
| Du cylindre | 50.8 | 61.0 | 68.6 | 74.9 | 81.3 | 92.7 | 102 | 109 | 117 | 122 | 127 | 133 | 141 | 145 |
| De la tige du piston | 5.1 | 6.0 | 7.0 | 7.6 | 8.4 | 8.9 | 10.2 | 10.8 | 11.4 | 12.1 | 12.4 | 12.7 | 13.3 | 14.0 |
| De la pompe à air | 30.5 | 38.1 | 43.2 | 44.4 | 47.0 | 53.3 | 58.4 | 62.1 | 66.0 | 70.0 | 71.1 | 76.2 | 80.0 | 86.4 |
| De la tige de la pompe à air | 3.2 | 4.4 | 5.1 | 5.4 | 5.7 | 6.3 | 7.0 | 7.4 | 7.6 | 8.3 | 8.9 | 9.5 | 10.2 | 10.8 |
| Du robinet d'injection | 3.2 | 3.8 | 4.1 | 4.4 | 5.1 | 5.7 | 6.3 | 7.0 | 7.6 | 7.9 | 8 3 | 8.3 | 8.6 | 8.9 |
| De la pompe à eau chaude | 5.7 | 6.3 | 7.6 | 8.4 | 8.9 | 10.2 | 10.8 | 11.4 | 12.7 | 14.0 | 15 2 | 16.5 | 17.8 | 19.0 |
| Du tuyau d'alimentation | 3.8 | 4.4 | 5.1 | 5.4 | 5.7 | 6 3 | 6.3 | 7.0 | 7.6 | 8.3 | 8.3 | 8.9 | 8.9 | 10.2 |
| Du tuyau à vapeur | 10.2 | 12.7 | 14.6 | 15.2 | 16.5 | 17.8 | 19.7 | 21.6 | 23.5 | 25.4 | 26.7 | 27.9 | 29.2 | 30.5 |
| Du tuyau de décharge de l'eau de condensation | 12.7 | 15.2 | 17.8 | 19.0 | 20.3 | 22.9 | 24.1 | 25.4 | 26.7 | 29.2 | 31.1 | 33.0 | 34.3 | 35.6 |
| De l'axe principal du balancier | 8.9 | 10.8 | 12.7 | 13.3 | 14.0 | 15.2 | 16.5 | 17.8 | 19.0 | 20.3 | 21.6 | 22 9 | 24.1 | 24.8 |
| Des axes extrêmes du balancier | 5.1 | 6.0 | 7.0 | 7.6 | 8.3 | 8.9 | 10.2 | 10.8 | 11.4 | 11.4 | 12.7 | 13.3 | 13.3 | 14.0 |
| Des tourillons sur le balancier des bielles de la pompe à air | 3.2 | 4.1 | 4.4 | 4.8 | 5.1 | 5.7 | 6.3 | 6.3 | 7.3 | 7.3 | 7.6 | 7.9 | 7.9 | 8.3 |
| Du bouton de la manivelle | 6.3 | 7.6 | 8.9 | 9.5 | 10.2 | 11.4 | 12.7 | 14.0 | 15.2 | 16.5 | 17.8 | 18.7 | 19.7 | 20.3 |
| De l'arbre moteur | 10.8 | 14.0 | 15.9 | 17.1 | 17.8 | 19.0 | 21.6 | 23.5 | 25.4 | 26.0 | 26.7 | 29.2 | 30.5 | 31.7 |
| Des roues à aubes | 274 | 335 | 335 | 366 | 396 | 396 | 457 | 518 | 518 | 579 | 579 | 640 | 640 | 701 |
| Des tourillons de l'arbre de commande des tiroirs | 5.1 | 5.7 | 6.3 | 6.3 | 6.7 | 5.7 | 7.0 | 7.0 | 7.6 | 8.3 | 8.3 | 8.9 | 9.5 | 9.5 |
| *Longueur de la course :* | | | | | | | | | | | | | | |
| Du piston du cylindre | 61.0 | 76.2 | 76.2 | 83.8 | 91.4 | 91.4 | 107 | 122 | 132 | 142 | 152 | 160 | 168 | 183 |
| Du piston de la pompe à air | 30.5 | 38.1 | 38.1 | 41.9 | 45.7 | 45.7 | 53.3 | 61.0 | 66.0 | 71.1 | 76.2 | 80.0 | 83.8 | 91.4 |
| Du piston plongeur de la pompe alimentaire | 15.2 | 19.0 | 19.0 | 20.3 | 22.9 | 22.9 | 26.7 | 30.5 | 33.0 | 35.6 | 38.1 | 40.6 | 41.9 | 45.7 |
| *Traverse de la tige du cylindre.* | | | | | | | | | | | | | | |
| Hauteur de la douille d'assemblage | 15.2 | 19.0 | 20.3 | 22.9 | 24.1 | 26.7 | 30.5 | 33.0 | 35.6 | 36.8 | 38.1 | 40.6 | 43.2 | 44.5 |
| Diamètre *id.* | 10.2 | 11.4 | 12.7 | 14.0 | 15.2 | 17.1 | 19 0 | 20.3 | 22.2 | 22.9 | 24.1 | 25.4 | 27.9 | 30.5 |
| Largeur au milieu de la traverse | 12.7 | 14.0 | 15.9 | 17.8 | 19.0 | 21.6 | 24.1 | 26.0 | 29.2 | 29.9 | 31.7 | 33.0 | 34.3 | 35.6 |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Épaisseur de la traverse. . . . . | 3.8 | 4.1 | 4.4 | 5.1 | 5.7 | 6.3 | 7.0 | 7.6 | 8.3 | 8.9 | 8.9 | 9.5 | 10.2 | 10.5 |
| *Traverse de la tige de la pompe à air.* | | | | | | | | | | | | | | |
| Hauteur de la douille d'assemblage. . . . . | 11.4 | 12.7 | 14.0 | 16.5 | 17.1 | 20.3 | 22.9 | 25.4 | 26.7 | 27.3 | 27.9 | 29.2 | 30.5 | 31.7 |
| Diamètre *id.* . . . . . | 7.0 | 8.6 | 8.9 | 10.2 | 10.5 | 11.7 | 13.0 | 13.3 | 14.6 | 15.2 | 16.5 | 17.1 | 18.4 | 19.0 |
| Largeur au milieu de la traverse. . . . . | 8.9 | 10.2 | 11.4 | 12.7 | 13.3 | 15.9 | 17.8 | 19.4 | 20.3 | 21.0 | 21.6 | 22.9 | 23.5 | 24.1 |
| Épaisseur de la traverse. . . . . | 2.5 | 2.9 | 3.2 | 3.5 | 3.8 | 4.4 | 5.1 | 5.4 | 5.7 | 5.7 | 6.0 | 6.3 | 7.0 | 7.0 |
| *Colonnes de support.* | | | | | | | | | | | | | | |
| Diamètre en haut. . . . . | 10.2 | 12.1 | 13.0 | 14.0 | 15.2 | 17.8 | 20.3 | 21.0 | 23.2 | 23.5 | 24.1 | 25.4 | 26.0 | 26.7 |
| Diamètre en bas. . . . . | 11.4 | 14.0 | 15.9 | 16.2 | 17.1 | 19.7 | 22.9 | 23.8 | 26.7 | 27.3 | 27.9 | 29.2 | 29.9 | 30.5 |
| *Distance de centre à centre :* | | | | | | | | | | | | | | |
| Des bielles latérales de la pompe à air. . . . | 74.9 | 87.0 | 95.0 | 100 | 107 | 121 | 135 | 142 | 154 | 160 | 170 | 174 | 178 | 183 |
| Des balanciers (du même cylindre) . . . . . | 83.8 | 99.0 | 108 | 114 | 122 | 137 | 152 | 160 | 175 | 175 | 183 | 198 | 203 | 211 |
| Des deux flasques du châssis. . . . . | 53.3 | 58.4 | 64.8 | 66.0 | 68.6 | 76.2 | 86.4 | 86.4 | 102 | 102 | 107 | 112 | 114 | 117 |
| Des cylindres des deux machines. . . . . | 168 | 183 | 193 | 203 | 213 | 224 | 244 | 254 | 274 | 274 | 284 | 320 | 325 | 330 |
| *Lumières à vapeur.* | | | | | | | | | | | | | | |
| Largeur. . . . . | 19.0 | 22.2 | 25.4 | 27.9 | 29.2 | 33.0 | 38.1 | 47.0 | 47.0 | 48.3 | 48.3 | 50.8 | 50.8 | 53.3 |
| Hauteur. . . . . | 3.8 | 4.4 | 5.1 | 5.7 | 6.3 | 7.0 | 7.6 | 7.6 | 10.2 | 10.8 | 10.8 | 11.4 | 12.1 | 12.1 |
| *Soupape à clapet du fond.* | | | | | | | | | | | | | | |
| Hauteur. . . . . | 5.1 | 5.1 | 6.3 | 6.3 | 8.3 | 9.5 | 10.2 | 11.4 | 12.7 | 14.0 | 14.0 | 15.2 | 16.5 | 17.8 |
| Longueur. . . . . | 33.0 | 35.6 | 39.4 | 43.2 | 45.7 | 50.8 | 61.0 | 66.0 | 71.1 | 73.7 | 73.7 | 78.7 | 78.7 | 81.3 |
| *Balancier.* | | | | | | | | | | | | | | |
| Largeur au milieu. . . . . | 35.6 | 45.7 | 48.3 | 53.3 | 58.4 | 63.5 | 71.1 | 73.7 | 83.8 | 84.6 | 88.9 | 91.4 | 96.5 | 99.1 |
| *Id.* aux extrémités. . . . . | 38.1 | 15.2 | 17.1 | 19.0 | 20.3 | 22.2 | 25.4 | 26.7 | 30.5 | 31.1 | 32.4 | 35.6 | 38.1 | 39.4 |
| Épaisseur. . . . . | 2.5 | 2.9 | 2.9 | 3.5 | 3.8 | 4.4 | 4.8 | 5.1 | 5.7 | 6.0 | 6.3 | 6.3 | 6.3 | 6.7 |

**397.** *Tableau* des formules donnant les dimensions des parties principales des machines à vapeur pour la navigation, d'après l'*Artizan-Club* (366).

Dans toutes les formules suivantes, les pressions sont exprimées en kilogrammes par centimètre carré, et les dimensions en centimètres.

$p$ excès maxima de pression de la vapeur dans la chaudière sur l'atmosphère.
P pression par centimètre carré de piston.
D diamètre du cylindre.
R rayon de la manivelle ou moitié de la course du piston.
$n$ force de la machine en chevaux.

On suppose un vide parfait derrière le piston, et la pression dans le cylindre égale à celle dans la chaudière; de sorte qu'on a

$$P = p + 1{,}033 \qquad (272)$$

Pour les machines de mer, les ruptures de pièces étant plus dangereuses et plus difficiles à réparer que pour les machines de terre, on multiplie P par un certain coefficient de sécurité $k$ pour les premières machines, et seulement $p$ pour les secondes; ainsi, dans les formules suivantes, on a

$$P = k\,(p + 1{,}033) \text{ pour les machines de mer,}$$
$$P = k \times p + 1{,}033 \text{ pour les machines de terre.}$$

$k$ est compris entre 1,5 et 2, ce dernier chiffre étant un maximum.
(*Int.*, n$^{os}$ 479 et suivants, pour la signification des exposants fractionnaires.)

TOURILLON DE L'ARBRE DES ROUES A PALES.

Diamètre du tourillon. . . . . $0{,}49723\,(R \times P \times D^2)^{\frac{1}{3}}$

Longueur ou portée du tourillon, $\delta$ étant son diamètre. . . . . $\left(1 + \frac{1}{4}\right)\delta.$

MANIVELLE.

Diamètre extérieur et longueur du moyeu d'assemblage avec l'arbre,

$d$ étant le diamètre de cet arbre. $d + \left(\frac{D[P \times 3{,}443 \times R^2 + 0{,}16433 \times D^2 \times P^2]^{\frac{1}{2}}}{64{,}97\sqrt{R}}\right)^{\frac{2}{3}}$

Diamètre extérieur de l'œil de la tête, $\delta$ étant le diamètre du bouton. . . . . $\delta + 0{,}0955 \times \sqrt{P} \times D$

Longueur ou portée du même œil. . . . . $0{,}1421 \times \sqrt{P} \times D$

Épaisseur qu'aurait le corps de la manivelle au centre de l'arbre. . . . . $\left(\frac{D^2 \times P \times \sqrt{1{,}561 \times R^2 + 0{,}0704 \times D^2 \times P}}{632{,}7}\right)^{\frac{1}{3}}$

La largeur au même point serait égale au double de l'épaisseur.

Épaisseur du corps de la manivelle au centre du bouton. . . . . $0{,}083 \times \sqrt{P} \times D$

La largeur au même point serait égale à 1,5 fois l'épaisseur.

TRAVERSE DE LA TIGE DU PISTON.

Longueur. . . . . $1{,}4 \times D$

| | |
|---|---|
| Diamètre extérieur du renflement ou de la douille d'assemblage, $\delta$ étant le diamètre intérieur. | $\delta + 0{,}068\,44 \times P^{\frac{1}{3}} \times D$ |
| Hauteur de la douille. | $0{,}237 \times P^{\frac{1}{3}} \times D$ |
| Diamètre du tourillon. | $0{,}064\,74 \times \sqrt{P} \times D$ |
| La longueur du tourillon est égale aux $\frac{9}{8}$ du diamètre. | |
| Épaisseur de la traverse en son milieu. | $0{,}059\,3 \times P^{\frac{1}{3}} \times D$ |
| Hauteur au même point. | $0{,}222\,2 \times P^{\frac{1}{3}} \times D$ |
| Épaisseur de la traverse près du tourillon. | $0{,}046 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Hauteur aux mêmes points. | $0{,}076\,6 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |

TIGE DU PISTON.

| | |
|---|---|
| Diamètre. | $\frac{P^{\frac{1}{2}} \times D}{44}$ |
| Longueur de la partie comprise dans le piston. | $0{,}15 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Diamètre maximum de la partie comprise dans la traverse. | $0{,}072 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Diamètre minimum de la même partie. | $0{,}068 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Diamètre maximum de la partie conique comprise dans le piston. | $0{,}106 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Diamètre minimum de la même partie. | $0{,}087 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Largeur de la clavette et des contre-clavettes d'assemblage de la tige avec la traverse. | $0{,}086\,7 \times P^{\frac{1}{3}} \times D$ |
| Épaisseur des mêmes pièces. | $0{,}017 \times P^{\frac{1}{3}} \times D$ |
| Largeur de la clavette d'assemblage avec le piston. | $0{,}064 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Épaisseur de la même clavette. | $0{,}026 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |

BIELLE PRINCIPALE.

| | |
|---|---|
| Diamètre de la bielle à ses extrémités. | $0{,}072 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Diamètre de la bielle en son milieu, $l$ étant la longueur de la bielle. | $(1 + 0{,}003\,5 \times l)\ 0{,}072 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Diamètre maximum de la partie comprise dans la traverse. | $0{,}074 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Diamètre minimum de la même partie | $0{,}068 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Largeur de la tête prise dans la chape. | $0{,}118\,1 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Épaisseur de la même partie. | $0{,}094 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Épaiss. moyenne de la chape au point de serrage de la clavette. | $0{,}032\,22 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Épaisseur moyenne au-dessus de la clavette. | $0{,}023\,92 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Distance entre la clavette et l'extrémité de la chape. | $0{,}036\,6 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |

| | |
|---|---|
| Largeur de la clavette et des contre-clavettes au point d'assemblage avec la traverse. . . . . | $0,0866 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Largeur des mêmes pièces au point d'assemblage de la tête avec la chape. . . . . | $0,083 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Épaiss. commune des clavettes et contre-clavettes de la bielle. | $0,021\,28 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |

BIELLES LATÉRALES OU BIELLES PENDANTES POUR LE CYLINDRE A VAPEUR.

(Pour les bielles pendantes de la pompe à air, on se sert des mêmes formules; seulement on remplace D par le diamètre de la pompe à air.)

| | |
|---|---|
| Diamètre des bielles pendantes de la traverse, aux extrémités. | $0,048\,7 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Diamètre au milieu ($l$ longueur de la bielle). . . | $(1 + 0,0035 \times l)\ 0,048\,7 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Largeur de la tête prise dans la chape. . . . . | $0,058\,1 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Épaisseur de la même pièce. . . . . | $0,046 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Diamètre du tourillon de la traverse qui porte la bielle. . . | $0,064\,74 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| La longueur de ce tourillon est égale aux $\frac{9}{8}$ du diamètre. | |
| Diamètre du tourillon au bas de la bielle. . . . . | $0,053 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Portée du même tourillon. . . . . | $0,057\,3 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Épaiss. moyenne de la chape au point de serrage de la clavette. | $0,024\,26 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Épaisseur moyenne au-dessous de la clavette. . . . . | $0,017\,7 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Largeur de la clavette et des contre-clavettes. . . . . | $0,06 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| Épaisseur des mêmes pièces. . . . . | $0,012\,5 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |

TOURILLON DE L'AXE PRINCIPAL DU BALANCIER.

| | |
|---|---|
| Diamètre du tourillon. . . . . | $0,138\,5 \times P^{\frac{1}{2}} \times D$ |
| La longueur du tourillon est égale à 1,5 fois le diamètre. | |

LUMIÈRES DE DISTRIBUTION DE LA VAPEUR.

| | |
|---|---|
| Aire des lumières en centimètres carrés. . . . . | $\frac{2,2 \times R \times D^2}{5486,4} + 52$ |

TUYAUX DE DISTRIBUTION DE LA VAPEUR.

| | |
|---|---|
| Diamètre de chaque tuyau. . . . . | $(0,000\,326 \times R \times D^2 + 65,8)^{\frac{1}{2}}$ |

POMPE ALIMENTAIRE.

| | |
|---|---|
| Capacité en centimètres cubes. . . . . | $\frac{R \times D^2}{480}$ |

SOUPAPE DE SURETÉ.

| | |
|---|---|
| Diamètre lorsqu'il y a une seule soupape. . . . . | $(3,2 \times n + 145,1)^{\frac{1}{2}}$ |
| *Idem.*, deux soupapes. . . . . | $(1,59 \times n + 72,56)^{\frac{1}{2}}$ |

| | |
|---|---|
| Diamètre lorsqu'il y a trois soupapes. . . . . | $(1{,}077 \times n + 48.38)^{\frac{1}{2}}$ |
| *Idem.*, quatre soupapes. . . . . | $(0{,}79 \times n + 36{,}28)^{\frac{1}{2}}$ |

GRAND LEVIER DE TRANSMISSION DE MOUVEMENT AU BALANCIER.

| | |
|---|---|
| Portée de l'œil des axes extrêmes du balancier. . . . . | $0{,}074 \times D$ |
| Épaisseur du même œil. . . . . | $0{,}052 \times D$ |
| Diamètre des axes ou tourillons extrêmes. . . . . | $0{,}07 \times D$ |
| Portée des mêmes tourillons. . . . . | $0{,}076 \times D$ |
| Diamètre des axes pour la pompe à air. . . . . | $0{,}045 \times D$ |
| Portée des mêmes axes. . . . . | $0{,}049 \times D$ |
| Hauteur du balancier au centre de rotation, $l$ étant la longueur du balancier supposé en fonte.. . . . . | $(0{,}061\,84 \times l \times D^2)^{\frac{1}{3}}$ |

POMPE A AIR.

| | |
|---|---|
| Diamètre du corps de pompe. . . . . | $0{,}6 \times D$ |

TRAVERSE DE LA TIGE DE SA POMPE A AIR.

| | |
|---|---|
| Épaisseur de l'œil d'assemblage avec la tige. . . . . | $0{,}25 \times D$ |
| Portée du même œil. . . . . | $0{,}171 \times D$ |
| Diamètre des tourillons extrêmes. . . . . | $0{,}051 \times D$ |
| Portée des mêmes tourillons. . . . . | $0{,}058 \times D$ |
| Épaisseur de la traverse en son milieu. . . . . | $0{,}043 \times D$ |
| Hauteur de la traverse au même point. . . . . | $0{,}161 \times D$ |
| Épaisseur de la traverse près des tourillons. . . . . | $0{,}037 \times D$ |
| Hauteur de la traverse aux mêmes points extrêmes. . . . . | $0{,}061 \times D$ |

TIGE DU PISTON DE LA POMPE A AIR.

| | |
|---|---|
| Diamètre de la tige. . . . . | $0{,}067 \times D$ |
| Largeur de la clavette et des contre-clavettes à la traverse. . . . . | $0{,}063 \times D$ |
| Épaisseur des mêmes pièces. . . . . | $0{,}013 \times D$ |
| Largeur de la clavette d'assemblage avec le piston. . . . . | $0{,}051 \times D$ |
| Épaisseur de la même clavette. . . . . | $0{,}021 \times D$ |

TIGES LATÉRALES OU BIELLES PENDANTES DE LA POMPE A AIR.

| | |
|---|---|
| Diamètre des bielles aux extrémités. . . . . | $0{,}039 \times D$ |
| Largeur de la tête prise dans la chape. . . . . | $0{,}046 \times D$ |
| Épaisseur de la même partie. . . . . | $0{,}037 \times D$ |
| Épaisseur moyenne de la chape au point de serrage de la clavette. . . . | $0{,}049 \times D$ |
| *Idem.* au-dessous de la clavette. . . . . | $0{,}014 \times D$ |
| Largeur de la clavette et des contre-clavettes. . . . . | $0{,}048 \times D$ |
| Épaisseur des mêmes pièces. . . . . | $0{,}01 \times D$ |

TUYAUX DE CONDUITE ET DE DÉCHARGE.

| | |
|---|---|
| Diamètre du tuyau de trop plein de l'eau de condensation. | $3{,}05 \times (n)^{\frac{1}{2}}$ |
| Aire du passage par le clapet d'aspiration de la pompe à air en centimètres carrés. . . . . | $11{,}6 \times n + 51{,}6$ |
| Aire du tuyau d'injection en centimètres carrés. . . . . | $0{,}445 \times n + 18{,}13$ |
| Diamètre du tuyau d'alimentation. . . . . | $(0{,}26 \times n + 19{,}35)^{\frac{1}{2}}$ |
| Diamètre du tuyau de décharge de la vapeur. . . . . | $(2{,}419 \times n + 108{,}871)^{\frac{1}{2}}$ |

**398.** *TABLEAU des dimensions des différentes parties des générateurs de quelques bateaux.* A l'exception du *Sphinx*, qui a été construit par M. Fawcett, et du *Transatlantique*, qui sort de l'usine d'Arras, tous les autres sont de MM. Maudslay et Field.

| | NOMS DES BATEAUX. | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | St-Pierre. | Liamone. | Rapide. | Africain. | Héva. | Castor. | Sphinx. | Eurotas. | Ténare. | Médéa. | Trans-atlantique. |
| Force en chevaux | 12 | 50 | 80 | 90 | 100 | 120 | 160 | 160 | 180 | 220 | 450 |
| Longueur de la chaudière | 2m.74 | 3m.165 | 5m.690 | » | » | 6m.120 | 6m.400 | 6m.650 | 6m.590 | 7m.130 | 12m.000 |
| Largeur de la chaudière | 2 .080 | 4 .06 | 3 .735 | » | » | 4 .71 | 5 .975 | 5 .040 | 5 .540 | 6 .260 | 7 .50 |
| Hauteur de la chaudière au milieu, non compris le coffre à vapeur | 1 .600 | 2 .130 | 2 .100 | » | » | 2 .760 | 2 .890 | 2 .680 | 2 .750 | 3 .250 | 2 .90 |
| Volume total de la chaudière | 8 .91 | 30 .66 | 45 .51 | 51m.15 | » | 75 .29 | 106 .66 | 84 .25 | 97. 56 | 131 .70 | 247 .05 |
| Volume d'eau contenu dans la chaudière | 2 .538 | 7 .534 | 15 .177 | 19 .82 | » | 30 .118 | 33 .212 | 32 .868 | 38 .650 | 50 .996 | 80 .944 |
| Volume de vapeur contenu dans la chaudière, y compris les coffres | 2 .140 | 11 .478 | 10 .114 | 12 .17 | » | 12 .080 | 28 .162 | 15 .924 | 18 .718 | 17 .768 | 77 .835 |
| Surface de chauffe totale | 20 .324 | 63 .166 | 96 .802 | 96 .28 | 83m.00 | 152 .832 | 194 .128 | 147 .964 | 169 .228 | 233 .102 | 419 .412 |
| *Id.* par cheval | 1 .694 | 1 .263 | 1 .210 | 1 .07 | 0 .83 | 1 .274 | 1 .213 | 0 .925 | 0 .940 | 1 .060 | 0 .932 |
| Nombre de corps de chaudière indépendants pour la production de la vapeur | 2 | 2 | 1 | 2 | » | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 4 |
| Nombre de foyers | 2 | 2 | 4 | 4 | 2 | 4 | 6 | 6 | 6 | 6 | 16 |
| Surface des grilles | 1m.008 | 2m.702 | 5m.204 | 5m.32 | 8m.00 | 6m.480 | 9m.776 | 7m.488 | 8m.818 | 10m.408 | 22m.040 |
| Diamètre de la cheminée | 0 .46 | 0 .62 | 0 .78 | 0 .86 | 0 .88 | 1 .067 | 1 .217 | 1 .05 | 1 .067 | 1 .18 | 2 .00 |
| Section des carneaux en mètres carrés | 0 .52 | 0 .80 | 0 .55 | 1 .14 | 0 .80 | 1 .38 | 1 .40 | 1 .48 | 1 .92 | 2 .88 | 5 .92 |
| Hauteur de la cheminée au-dessus du dôme, non compris le couronnement | 5 .00 | 9 .15 | 12 .95 | » | » | 12 .20 | 14 .60 | 11 .20 | 11 .20 | 11 .50 | 11 .00 |
| Hauteur totale de la cheminée | 6 .60 | 11 .28 | 15 .16 | » | » | 14 .96 | 17 .49 | 13 .88 | 13 .95 | 14 .75 | 13 .96 |

De ce tableau, il résulte les valeurs limites et moyennes suivantes, par force de cheval, des chaudières à parois planes et à conduits intérieurs.

| PARTIES DES CHAUDIÈRES. | | FORCES DES APPAREILS. | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Petites. | Moyennes. | Grandes. |
| Surfaces des grilles, | en mètres carrés. | 0.085 | 0.065 | 0.045 |
| Surfaces de chauffe, | *id.* . . . . | 1.700 | 1.300 | 0.900 |
| Sections totales des carneaux, | *id.* . . . . | 0.044 | 0.030 | 0.013 |
| Sections des cheminées, | *id.* . . . . | 0.015 | 0.011 | 0.007 |
| Volumes des chaudières, | en mètres cubes. | 0.750 | 0.650 | 0.550 |
| Volumes de l'eau, | *id.* . . . . | 0.220 | 0.190 | 0.160 |
| Volumes de la vapeur, | *id.* . . . . | 0.180 | 0.150 | 0.120 |
| Volumes des foyers et carneaux, | *id.* . . . . | 0.350 | 0.310 | 0.270 |

EXTRAIT DE L'ORDONNANCE DU 23 MAI 1843 *relative aux bateaux à vapeur qui naviguent sur les fleuves et rivières* (312).

**399.** *Autorisation de navigation.* Aucun bateau à vapeur ne peut naviguer sur les fleuves et rivières sans un permis de navigation. La demande de ce permis est adressée par le propriétaire du bateau au préfet du département où se trouve le point de départ. Dans cette demande le propriétaire fait connaître :

1° Le nom du bateau;
2° Ses principales dimensions, son tirant d'eau à vide (383), et sa charge maximum exprimée en tonneaux de 1000 kilogrammes;
3° La force de l'appareil moteur, exprimée en chevaux-vapeur (36);
4° La pression, évaluée en atmosphères et fraction décimale d'atmosphère, sous laquelle l'appareil fonctionnera;
5° La forme de la chaudière, le service auquel le bateau est destiné, et les points de départ, de stationnement et d'arrivée;
6° Le nombre maximum des passagers qui pourront être reçus dans le bateau.
Un dessin géométrique de la chaudière est joint à la demande.

La demande de permis est envoyée par le préfet à la commission de surveillance instituée dans le département, et de laquelle les ingénieurs des mines et des ponts et chaussées font partie. Cette commission visite le bateau, afin de s'assurer s'il offre toutes les garanties de solidité et s'il n'offre aucun danger d'explosion ou d'incendie. Après cette visite, la commission assiste à un essai du bateau à vapeur, afin de s'assurer si le moteur a une force suffisante pour le service auquel il est destiné. Elle constate la hauteur des eaux lors de l'essai, le tirant d'eau, la vitesse du bateau en montant et en descendant, les divers degrés de

tension de la vapeur dans la chaudière pendant la marche du bateau. La commission dresse procès-verbal de sa visite et de son essai, en proposant les conditions auxquelles le permis peut être délivré, ou en exposant les motifs pour lesquels elle juge qu'il est convenable de surseoir à la délivrance du permis ou même de le refuser. D'après le procès-verbal de la commission, le préfet refuse ou délivre le permis, qui contient toutes les mesures d'ordre et de sûreté. Ce permis n'est valable que pour un an, et à chaque renouvellement la commission est consultée.

Si le bateau a été muni de son appareil moteur et mis en état de naviguer dans un département autre que celui où il doit entrer en service, le propriétaire doit obtenir du préfet du premier de ces départements une autorisation provisoire de navigation pour faire arriver le bateau au lieu de sa destination. La commission de surveillance est consultée sur la demande. L'autorisation provisoire ne dispense pas le propriétaire du bateau de l'obligation d'obtenir un permis définitif de navigation lorsque ce bateau est arrivé au lieu de sa destination.

400. *Épreuves des chaudières à vapeur. Épaisseur de ces chaudières.* Le fabricant ne peut livrer aucune machine à vapeur sans qu'elle ait subi les épreuves prescrites ci-après :

Les chaudières à vapeur, leurs tubes bouilleurs et les réservoirs à vapeur, les cylindres en fonte des machines à vapeur et les enveloppes en fonte de ces cylindres ne peuvent être établis à bord des bateaux, sans avoir été préalablement soumis par les ingénieurs des mines, ou, à leur défaut, par les ingénieurs des ponts et chaussées, à une pression triple de la pression effective $n-1$ de la vapeur dans la chaudière (313); cette épreuve s'opère, comme pour les machines fixes, à l'aide d'une pompe de pression (314).

Les chaudières qui ont des faces planes sont dispensées de l'épreuve, mais sous la condition que la force élastique de la vapeur ne s'élèvera pas dans la chaudière à plus d'une atmosphère et demie.

Ces épreuves sont faites à la fabrique, par ordre du préfet, sur la déclaration du fabricant. Elles sont renouvelées après l'installation dans les mêmes circonstances que pour les machines fixes (314), et pendant la marche, si la commission de surveillance le juge à propos, ou si les chaudières ou autres pièces ont subi des changements notables (les propriétaires sont tenus de donner connaissance de ces changements au préfet).

Les machines venant de l'étranger sont pourvues des mêmes appareils de sûreté que les machines d'origine française, et subissent les mêmes épreuves. Ces épreuves sont faites au lieu désigné par le destinataire dans la déclaration qu'il doit faire à l'importation.

L'usage des chaudières et des tubes bouilleurs en fonte est prohibé sur les bateaux.

L'épaisseur des chaudières cylindriques en tôle ou en cuivre laminé se règle comme pour les chaudières fixes (313).

Les chaudières, tubes bouilleurs, réservoirs à vapeur, et les cylindres en fonte ainsi que leurs enveloppes en fonte doivent, comme pour les machines fixes, porter un timbre apparent indiquant la pression absolue $n$ de la vapeur dans la chaudière (313).

**401.** *Soupapes de sûreté.* Chaque chaudière porte deux soupapes, disposées et chargées comme pour les machines fixes. Leur diamètre et l'épaisseur de leur rebord se règlent également comme au n° 316.

Il est de plus adapté à la partie supérieure des chaudières à faces planes, une soupape atmosphérique, c'est-à-dire une soupape s'ouvrant du dehors au dedans.

Les propriétaires de bateaux à vapeur sont tenus d'adapter aux machines et chaudières employées dans ces bateaux les appareils de sûreté qui pourraient être découverts par la suite, et qui seraient prescrits par des règlements d'administration publique.

**402.** *Manomètres.* Toute chaudière à vapeur est munie d'un manomètre gradué et disposé comme pour les machines fixes (317).

Le manomètre à air libre n'est exigé que pour des pressions effectives ne dépassant pas 2 atmosphères (au-dessus de cette limite il devient embarrassant de le disposer sur le bateau).

**403.** *Alimentation des chaudières à vapeur, et indicateurs du niveau de l'eau dans les chaudières.* Chaque chaudière est munie d'une pompe alimentaire bien construite et en bon état d'entretien. Indépendamment de cette pompe, mise en mouvement par la machine motrice du bateau, chaque chaudière est pourvue d'une autre pompe pouvant fonctionner, soit à l'aide d'une machine particulière, soit à bras d'hommes, et destinée à alimenter la chaudière, s'il en est besoin, lorsque la machine motrice du bateau ne fonctionne pas.

Le niveau habituel de l'eau dans la chaudière est le même que pour les chaudières fixes (318), et il est également indiqué à l'extérieur par une ligne apparente.

Il est adapté à chaque chaudière : 1° deux tubes indicateurs en verre, qui sont placés un à chaque côté de la face antérieure de la chaudière ; 2° l'un des deux appareils suivants, savoir : un flotteur d'une mobilité suffisante ; des robinets indicateurs, convenablement placés à des niveaux différents. Les appareils indicateurs sont, dans tous les cas, disposés de manière à être en vue du chauffeur.

Si plusieurs chaudières sont établies dans un bateau, elles ne peuvent être mises en communication que par les parties toujours occupées par la vapeur, et cette communication est disposée de manière que les chaudières puissent, au besoin, être rendues indépendantes les unes des autres. Dans tous les cas, chaque chaudière est alimentée séparément et munie de tous les appareils de sûreté.

**404.** *Emplacement des appareils moteurs.* Cet emplacement doit être assez grand pour qu'on puisse faire le service des chaudières et visiter toutes les parties des appareils. Cet emplacement est séparé des salles des passagers par des cloisons en planches très-solidement construites, et entièrement revêtues d'une doublure en tôle, à recouvrement, d'un millimètre d'épaisseur au moins.

**405.** *De l'installation des bateaux à vapeur, des agrès, des apparaux et des équipages.* Le pont est garni de garde-corps d'une hauteur suffisante pour la sûreté des voyageurs; toutes les ouvertures pratiquées au-dessus des machines et des chaudières, qui ne sont pas habituellement fermées par un panneau plein, sont munies d'un grillage en fer ou en bois.

De chaque côté du bateau se trouve placé un escalier d'embarquement (en bois ou en fer), avec une rampe ou une corde à nœuds solidement fixée.

Les tambours qui, de chaque côté du bateau, enveloppent les roues motrices, sont munis d'une défense en fer, descendant assez près de la surface de l'eau pour empêcher les embarcations de s'engager dans les palettes des roues.

Lorsque la cheminée est mobile, et qu'elle ne se trouve pas disposée de manière à être en équilibre sur son axe de rotation dans toutes les positions, il est établi, sur le pont du bateau, un support suffisamment élevé pour arrêter la cheminée en cas de chute, et prévenir tout accident.

La ligne de flottaison indiquant le maximum du chargement est tracée d'une manière apparente sur le pourtour entier de la carène, d'après les points de repère déterminés par le permis de navigation.

Le nom du bateau est inscrit en gros caractères sur chacun de ses côtés.

Dans chaque bateau se trouvent :

1° Deux ancres au moins pouvant être jetées immédiatement;
2° Un canot à la traîne ou suspendu à des palans, de manière à pouvoir être au besoin mis immédiatement à l'eau. Les dimensions de ce canot sont déterminées par le préfet, d'après l'avis de la commission de surveillance;
3° Une bouée de sauvetage en liége, suspendue sous l'arrière;
4° Une hache en bon état, à portée du timonier;
5° Une cloche pour donner les avertissements nécessaires;
6° Une boîte fumigatoire pour administrer des secours aux asphyxiés;
7° Des manomètres de rechange, ainsi que des tubes indicateurs de rechange.

Si le bateau est exposé à être poussé accidentellement à la mer, il est muni des cartes et des instruments nautiques nécessaires à cette navigation.

Indépendamment du capitaine, maître ou timonier, et des matelots

ou mariniers formant l'équipage, il y a à bord de chaque bateau un mécanicien et autant de chauffeurs que l'appareil moteur l'exige.

Nul ne peut être employé en qualité de capitaine ou de mécanicien, s'il ne produit des certificats de capacité délivrés dans les formes déterminées par notre ministre des travaux publics.

406. *Mesures diverses concernant le service des bateaux à vapeur.* Dans toutes les localités où cela est possible, il est assigné à chaque bateau à vapeur, un lieu de stationnement distinct de celui des autres bateaux. En cas de concurrence, les heures de départ sont réglées par le préfet.

Aucun bateau à vapeur ne doit quitter le point de départ et les lieux de stationnement pendant la nuit, ni en temps de brouillard, de glaces ou de débordements, à moins d'une permission spéciale délivrée par l'autorité chargée de la police locale. Tout bateau à vapeur naviguant pendant la nuit tient constamment allumés deux fanaux placés, l'un à l'avant, l'autre à l'arrière. Ces deux fanaux sont à verres blancs lorsque le bateau descend, et à verres rouges lorsqu'il remonte. En cas de brouillard, le capitaine fait tinter continuellement la cloche du bateau pour éviter les abordages.

Si deux bateaux à vapeur, marchant en sens inverse, viennent à se rencontrer, le bateau descendant ralentit son mouvement, et chaque bateau serre le chenal de navigation à sa droite. Si les dimensions de ce chenal sont telles qu'il ne reste pas entre les parties les plus saillantes des bateaux un intervalle libre de 4 mètres au moins, le bateau qui remonte s'arrête et attend, pour reprendre sa route, que celui qui descend ait doublé le passage. Dans les rivières à marée, le bateau qui vient avec le flot est censé descendre.

Si la rencontre a lieu entre deux bateaux à vapeur marchant dans la même direction, celui qui est en avant serre le chenal de navigation à sa droite; celui qui est derrière, le chenal à sa gauche.

Si les dimensions du chenal ne permettent pas le passage de deux bateaux, le bateau qui est en arrière ralentit son mouvement, et attend que la passe soit passée pour reprendre toute sa vitesse. Des arrêtés du préfet désignent les passes où il est interdit aux bateaux à vapeur de se croiser ou de se dépasser.

Les capitaines des bateaux à vapeur peuvent prendre ou déposer en route des voyageurs ou des marchandises, qui sont transportés dans des batelets; mais ils doivent faire arrêter l'appareil moteur du bateau, afin que les batelets puissent accoster sans danger. Ces batelets, avant d'aborder, sont amarrés au bateau à vapeur, et celui-ci ne doit continuer sa navigation que lorsqu'ils ont été poussés au large.

Pour chaque localité, un arrêté du préfet détermine les conditions de solidité et de stabilité des batelets destinés au service d'embarquement et de débarquement des passagers, le nombre des personnes que

ces batelets peuvent recevoir, et le nombre des mariniers nécessaires pour les conduire. Le maire de la commune délivre les permis de service après s'être préalablement assuré que les batelets sont conformes aux dispositions de sûreté prescrites, et que les mariniers remplissent les conditions exigées par l'art. 47 de la loi du 6 frimaire an VII; c'est-à-dire que ces mariniers doivent être munis de certificats des commissaires civils de la marine dans les lieux où ces sortes d'emplois sont établis, ou de l'attestation de quatre anciens mariniers conducteurs, donnée devant l'administration municipale dans les autres lieux.

Sur les points où le service des batelets serait dangereux, les préfets peuvent en interdire l'usage.

407. *Conduite du feu et des appareils moteurs.* Le mécanicien, sous l'autorité du capitaine, préside à la mise en feu avant le départ; il entretient toutes les parties de l'appareil moteur; il s'assure qu'elles fonctionnent bien et que les chauffeurs sont en état de bien faire leur service. Pendant le voyage, il dirige les chauffeurs et s'occupe constamment de la conduite de la machine.

Il est tenu, à bord de chaque bateau, un registre dont toutes les pages sont cotées et parafées par le maire de la commune où est le siége de l'entreprise, et sur lequel le mécanicien inscrit d'heure en heure :

1° La hauteur du manomètre;
2° La hauteur de l'eau dans la chaudière, relativement à la ligne d'eau (403);
3° Le lieu où se trouve le bateau.

A la fin de chaque voyage, le mécanicien signe ces indications dont il certifie l'exactitude.

Il est défendu aux propriétaires de bateaux à vapeur et à leurs agents de faire fonctionner les appareils moteurs sous une pression supérieure à celle déterminée dans le permis de navigation, et de rien faire qui puisse détruire ou diminuer l'efficacité des moyens de sûreté dont ces appareils sont pourvus.

408. *Dispositions relatives aux passagers.* Il est défendu de laisser aucun passager s'introduire dans l'emplacement de l'appareil moteur.

Indépendamment du registre du mécanicien (407), il est ouvert dans chaque bateau à vapeur un autre registre dont toutes les pages sont cotées et parafées de la même manière, et sur lequel les passagers ont la faculté de consigner leurs observations, en ce qui pourrait concerner le départ, la marche et la manœuvre du bateau, les avaries ou accidents quelconques, et la conduite de l'équipage : ces observations doivent être signées par les passagers qui les font. Le capitaine peut également consigner sur ce registre les observations qu'il jugerait convenable, ainsi que tous les faits qu'il lui paraîtrait important de faire attester par les passagers.

Dans chaque salle où se tiennent les passagers, il est affiché une copie du permis de navigation et un tableau indiquant :

1° La durée moyenne des voyages, tant en montant qu'en descendant, et en ayant égard à la hauteur des eaux ;
2° La durée des stationnements ;
3° Le nombre maximum des passagers ;
4° La faculté qu'ils ont de consigner les observations sur le registre ouvert à cet effet ;
5° Le tarif des places.

Les propriétaires de bateaux à vapeur sont tenus de recevoir à bord et de transporter gratuitement les inspecteurs de la navigation, gardes de rivières, ou autres agents qui seraient chargés spécialement de la police et de la surveillance de ces bateaux.

# QUATRIÈME PARTIE.

## Chemins de fer.

---

409. *Coup d'œil historique.* C'est en 1682 qu'on a construit, aux environs de Newcastle, pour le transport de la houille, les premières lignes de rail-ways, mais les rails étaient en bois; vers 1738, on les fit en fonte, et ce n'est qu'en 1805 que l'on commença à les faire en fer malléable. Les wagons étaient remorqués par des chevaux, et ce n'est guère que depuis l'invention de la machine locomotive, que les chemins de fer ont commencé à croître en importance. C'est à Nicolas-Joseph Cugnot, né à Metz en 1725, que l'on doit les premiers essais tentés pour appliquer au mouvement des voitures la force élastique de la vapeur. Vers 1770, cet ingénieur construisit une petite voiture que faisait mouvoir la seule force de la vapeur.

Depuis à peu près cinquante ans, M. Stephenson construit des machines locomotives; mais elles ne parcouraient que quatre lieues à l'heure. En 1826, M. Séguin imagina la chaudière tubulaire, dont M. Stephenson produisit, en 1828, le tirage par le jet de vapeur. Depuis cette époque, les locomotives exécutées, soit par ce dernier, soit par tous les autres constructeurs, ont marché avec une vitesse de 15, 18 et jusqu'à 25 lieues à l'heure. Depuis 1828, on n'a guère apporté aux locomotives que des perfectionnements de détails, mais qui ont eu cependant une influence bien sensible, soit sur la régularité de la marche, soit sur l'économie du combustible.

Les essais faits jusqu'à ce jour sur les chemins de fer atmosphériques ne permettent pas d'espérer que, sauf quelques cas exceptionnels, ce système remplacera l'ancien, à moins qu'on n'y apporte de nouveaux perfectionnements.

410. *Division des chemins de fer.* Afin de diminuer le tirage des voitures et d'accélérer la vitesse de transport, on construit des chemins en pierre, en bois et en fer. Ces derniers, qui sont les plus importants, se divisent en chemins de fer de premier et de second ordre. Ceux de premier ordre sont les chemins de fer permanents que l'on construit

aujourd'hui pour les grandes lignes de communication ; ils sont destinés au transport, soit des marchandises, soit des voyageurs. Ceux de second ordre, par lesquels a commencé l'usage de ce genre de voies, ne sont que temporaires ; on ne les établit guère que dans les usines ou dans les magasins, pour y faciliter le transport des matières premières et des produits fabriqués, ou des marchandises.

**411.** *Chemin de fer de service ou de second ordre.* Les chemins de fer de second ordre sont simplement formés de deux lignes de barres de fer plates de 4 mètres de longueur, placées de champ, et reposant sur des traverses en bois de $0^m,15$ à $0^m,20$ d'équarrissage. Les barres de fer sont fixées, à l'aide de coins en bois, dans des entailles que portent les traverses ; l'écartement de ces traverses est de 1 mètre. Quelquefois les barres de fer sont carrées, et on les fixe sur les traverses en bois au moyen de clous ou de vis à tête noyée. Les barres de fer sont quelquefois posées à plat sur deux lignes de madriers en bois de $0^m,15$ à $0^m,20$ d'équarrissage, sur lesquelles elles sont fixées de distance en distance par des clous ou des vis à tête fraisée. C'est sur ces deux lignes de barres de fer que roulent les roues des wagons. Ces chemins n'offrent jamais une grande solidité, aussi ne les construit-on que pour des communications de peu d'importance.

*TABLEAU des dimensions moyennes de quelques rails de chemins de service.*

| DÉSIGNATION des CHEMINS. | DIMENSION des barres | | POIDS d'un chariot chargé. | DISTANCE des traverses. | OBSERVATIONS. |
|---|---|---|---|---|---|
| | verticales. | horizontales. | | | |
| | m. | m. | k. | m. | |
| Pont-canal de Digoin. . | 0.060 | 0.016 | 4000 | 1.00 | |
| Pont-canal de l'Allier. . | 0.070 | 0.009 | 1400 | 1.00 | |
| Pont de Roanne. . . . | 0.070 | 0.015 | 1300 | 1.00 | |
| Leeds et Selby. . . . . | 0.030 | 0.030 | 2500 | 1.10 | |
| Soccoa. . . . . | 0.012 | 0.030 | 2900 | . . . | Rails sur longrines de $0^m.15$ sur $0^m.15$. |
| Travaux de Cherbourg. | 0.030 | 0 050 | 6000 | . . . | *Idem* de $0^m.20$ sur $0^m.15$. |
| Canal de Bourgogne. . | 0.005 | 0.040 | . . . | . . . | Rails sur longrines. |

Depuis quelques années, on construit des chemins économiques pour le transport des voyageurs à de petites distances ; ces chemins ont pris naissance en Amérique, et on vient d'en établir un entre Paris et Saint-Cloud. Les rails sont creusés en gorge à la partie supérieure, et cette gorge guide les rebords des roues. Les rails ont 6 mètres de longueur ; ils pèsent 18,60 à 20 kilog. le mètre courant, et 14 chevilles les fixent sur des longrines reposant sur des traverses. Sous les joints des

rails, on place des plaques en fer de $0^m,15$ de longueur, $0^m,042$ de largeur et $0^m,01$ d'épaisseur. Ces voies sont placées au niveau du sol sur les bas côtés de la route. Les rampes sont habituellement inférieures à $0^m,01$; mais pour franchir de petits espaces de 20 à 30 mètres, elles atteignent parfois $0^m,06$ à $0^m,08$. Les courbes ont 50 mètres de rayon et au-dessus. Les bois ont généralement 2 mètres de long, $0^m,10$ de large et $0^m,15$ de haut. Les axes des rails sont espacés de $1^m,54$. Ce chemin a coûté 27000 fr. le kilomètre. Deux chevaux traînent une voiture contenant environ 50 personnes à la vitesse de 15 à 16 kilomètres à l'heure (*Nouvelles Annales de la construction*).

## CHEMINS DE FER DE PREMIER ORDRE.

### ÉTABLISSEMENT DE LA VOIE.

**412.** *Largeur de la voie.* (Les nombres qui suivent, sur l'établissement de la voie, sont en partie extraits de l'ouvrage de MM. Perdonnet et Polonceau, *Portefeuille de l'ingénieur des chemins de fer.*) En France et en Belgique, et généralement en Angleterre, pour le transport des voyageurs, la distance d'axe en axe des deux files de rails est de $1^m,50$, ou de $1^m,44$ entre les faces intérieures des rails; sur le chemin de Londres à Yarmouth, cette distance intérieure est de $1^m,52$; sur le chemin de Dundee à Arbroath et d'Arbroath à Forfar (Écosse), elle est de $1^m,68$; sur les chemins d'Irlande et sur celui de Saint-Pétersbourg à Zarcoe-Selo, $1^m,83$; sur ceux de Hollande, $1^m,93$; sur le chemin de Londres à Bristol, où tout dépasse les limites ordinaires, M. Brunel fils l'a portée à $2^m,13$; la vitesse habituelle de circulation y est de 12 à 15 lieues à l'heure, au lieu de 9 à 12 qu'elle est ordinairement sur les autres chemins. Un chemin économique, construit de Gand à Anvers, n'a que $1^m,10$ de largeur de voie; sur ce chemin, une machine locomotive avec son tender ne pèse que 5 tonnes. L'augmentation de largeur de la voie permet d'augmenter les dimensions et la puissance des machines. Cependant, dans ces derniers temps, on a, pour la largeur $1^m,44$, établi des machines qui remorquent une charge convenable à une vitesse qui atteint 80 kilomètres, ou une charge de 450 tonnes de poids utile à une petite vitesse sur des pentes de $0^m,005$.

**413.** *Entre-voie.* Sur la plupart des chemins français et belges, l'entre-voie a $1^m,80$; sur le chemin de Londres à Birmingham, elle a $1^m,92$; sur celui de Bristol, $1^m,87$; sur les chemins du Midi, $1^m,86$; sur celui de Lyon, $2^m,20$; sur celui de Bruxelles à Mons, $2^m,50$. Sur le chemin de Versailles (rive gauche), la distance des caisses de deux diligences placées sur deux voies différentes est de $0^m,84$ (il n'y a aucun danger pour le voyageur qui passe la tête à la portière), et la distance

des marchepieds est de 0m,45. Avec cet espacement de voitures, il faut éviter de réduire la largeur 1m,80 de l'entre-voie, en y plaçant des colonnettes en fonte soutenant des ponts. Sur les nouvelles lignes, on adopte l'entre-voie de 2 mètres à 2m,20, ce qui permet d'augmenter un peu la largeur des caisses.

414. *Accotements.* Sur les chemins anglais, la largeur des accotements est, pour les terrains ordinaires, de 0m,50 plus grande sur remblai que dans les tranchées. Dans les terrains marécageux, elle est au contraire plus grande dans les tranchées que sur remblai ; ainsi, elle est de 3 mètres dans les tranchées et de 1m,50 à 2 mètres sur remblai. Sur le chemin de Versailles (rive gauche), cette largeur, comptée depuis la face extérieure du rail, est de 1m,57 en remblai, et de 0m,87 dans les tranchées; sur le chemin de Bristol, cette largeur, comptée de l'extérieur du rail à la crête du remblai ou à l'arête du fossé, est, en terrain ordinaire, de 1m,45; sur le chemin de Liverpool à Manchester, elle est de 1m,52 ; sur le chemin de Londres à Birmingham, de 2m,20, et sur les nouveaux chemins belges (Bruxelles à Mons), de 1m,75. Il convient, d'après M. Perdonnet, pour la sûreté de la circulation, de ne pas lui donner moins de 1m,50.

Dans les souterrains, et quelquefois dans les ouvrages d'art, on diminue la largeur des accotements afin de réduire la dépense. L'eau s'écoule alors par un fossé ou aqueduc placé au milieu de l'entre-voie.

L'administration des ponts et chaussées prescrit, pour la distance de la face extérieure du rail à l'arête extérieure du chemin, 1 mètre en déblai, en souterrain et sur les ponts, et 1m,50 en remblai.

415. *Fossés, sentiers le long des barrières, talus.* Les dimensions des fossés doivent être en rapport avec la quantité d'eau qu'ils reçoivent et à laquelle ils doivent donner un écoulement facile (cinquième partie). Sur les chemins de l'Est, les dimensions ordinaires des fossés sont : 0m,60 de largeur en haut, 0m,20 au fond, et 0m,20 de profondeur.

Il suffit que les sentiers placés le long des barrières aient 1 mètre de largeur entre le remblai et les barrières.

La compagnie doit acheter 2 ou 3 mètres de largeur de terrain au delà des crêtes des tranchées; on y établit des fossés qui empêchent les eaux de descendre sur les talus.

Dans les grandes tranchées, on établissait, à une faible hauteur au-dessus du fossé, une petite banquette de 0m,30 de largeur, avec une légère contre-pente pour retenir les petites pierres qui se détachaient des talus. Comme ces banquettes n'atteignaient qu'imparfaitement le but qu'on s'était proposé, on les remplace aujourd'hui par une banquette ménagée entre le ballast et le fossé, et qui sert de chemin pour les employés et de dépôt pour la boue que l'on retire du fossé.

Il y a des terres qui se soutiennent sous un angle de 45°, mais d'autres qui coulent sous des angles faibles (cinquième partie).

**416.** *Ouverture et hauteur des ponts.* Quand le chemin devra passer au-dessus d'une route impériale ou départementale, ou d'un chemin vicinal (cahier des charges des principaux chemins français), l'ouverture du pont ne sera pas moins de 8 mètres pour la route impériale, 7 mètres pour la route départementale, 5 mètres pour un chemin vicinal de grande communication, et 4 mètres pour un chemin vicinal ordinaire.

La hauteur sous la clef, à partir de la chaussée de la route, sera de 5 mètres au moins. Pour les ponts en charpente, la hauteur sous poutres sera de $4^{m},30$ au moins. La largeur entre les parapets sera de $7^{m},40$ au moins, et la hauteur de ces parapets de $0^{m},80$ au moins.

Si, au contraire, le chemin de fer passe au-dessous d'une route impériale, d'une route départementale, d'un chemin vicinal de grande communication ou d'un simple chemin vicinal, la largeur minimum entre les parapets du pont qui supportera ces différentes voies sera respectivement de 8 mètres, 7 mètres, 5 mètres et 4 mètres.

L'ouverture du pont entre les culées sera au moins de 8 mètres, et la hauteur de l'intrados, mesurée verticalement au-dessus des rails extérieurs, ne sera pas moins de $4^{m},50$.

Cette hauteur minima était de $4^{m},30$, et ne présentait aucun inconvénient pour les ponts en maçonnerie dont la voûte est un arc de cercle avec des flèches de 1/6 à 1/7, comme pour les ponts avec fermes en fonte ou en charpente; mais il n'en était pas ainsi pour les ponts en maçonnerie à plein cintre.

Avec cette hauteur minima, il n'est pas possible d'ouvrir entièrement les portières des voitures de voyageurs; les siéges des conducteurs de trains sont réduits à de très-petites dimensions, quoique leur angle extérieur passe à $0^{m},05$ de l'intrados de la voûte, et on est gêné pour l'arrimage des marchandises encombrantes sur les plates-formes des wagons, et pour le transport des voitures de roulage sur trucks.

Ces inconvénients ont même déterminé diverses compagnies à porter, comme pour les souterrains, à $4^{m},60$ la hauteur de l'intrados au-dessus des rails extérieurs pour les ponts en maçonnerie à plein cintre, ce qui donne $5^{m},50$ de hauteur au-dessus des rails dans l'axe du pont. (418.)

DIMENSIONS PRINCIPALES DU MATÉRIEL ROULANT DES CHEMINS DE FER DU MIDI, POUR SERVIR A L'ÉTABLISSEMENT DES QUAIS ET OUVRAGES D'ART.

*Machines-tender mixtes et machines-tender à voyageurs.*

| | |
|---|---|
| Longueur de dehors en dehors des tampons. . . . . | $8^{m},870$ |
| Largeur totale aux traverses extrêmes. . . . . | 2 ,700 |
| Hauteur totale depuis le dessus des rails, cheminée comprise. . . . . | 4 ,200 |
| Hauteur de la caisse à eau au-dessus du rail. . . . . | 2 ,870 |
| Hauteur des extrémités inférieures des clefs des bielles motrices et d'accouplement au-dessus du rail. . . . . | 0 ,315 |

| | |
|---|---|
| Hauteur des chasse-pierres au-dessus du rail | $0^m,045$ |
| Écartement longitudinal des chasse-pierres | 7 ,745 |
| Écartement d'axe en axe des essieux extrêmes | 4 ,700 |
| Diamètre de la circonférence décrite par l'extrémité des tampons | 9 ,030 |
| *Idem.* des chasse-pierres | 7 ,900 |
| Calage intérieur des roues d'avant et d'arrière | 1 ,360 |
| *Idem.* du milieu | 1 ,365 |

*Machine avec son tender.*

| | |
|---|---|
| Longueur totale d'une machine et de son tender accouplés (chemin de fer du Nord) | 13 ,600 |

*Voitures et wagons.*

| | | |
|---|---|---|
| Hauteur de l'axe des tampons au-dessus du rail | non chargé | 1 ,030 |
| | chargé | 0 ,980 |
| Calage intérieur des roues | | 1 ,362 |

*Voitures de 1re classe, 2e classe et wagons à bagages.*

| | | |
|---|---|---|
| Longueur de dehors en dehors des tampons | | $7^m,220$ |
| Hauteur du dessous du 1er marchepied au-dessus du rail (voiture chargée) | | 0 ,490 |
| Largeur de dehors en dehors des marchepieds | | 3 ,100 |
| Largeur de dehors en dehors des tampons | | 2 ,100 |
| Hauteur de la guérite au-dessus du rail (La guérite est placée sur le côté) | minima | 3 ,450 |
| | maxima | 3 ,530 |
| Écartement d'axe en axe des essieux | | 3 ,600 |
| Diamètre de la circonférence décrite par l'extrémité des tampons | | 7 ,422 |

*Voitures de 3e classe et voitures mixtes.*

| | | |
|---|---|---|
| Longueur de dehors en dehors des tampons | | 8 ,120 |
| Hauteur du dessous du 1er marchepied au-dessus des rails (voiture chargée) | | 0 ,490 |
| Largeur de dehors en dehors des marchepieds | | 3 ,100 |
| Largeur de dehors en dehors des tampons | | 2 ,100 |
| Hauteur de la guérite de 3e classe au-dessus du rail (La guérite est placée sur le côté) | minima | 3 ,450 |
| | maxima | 3 ,530 |
| Écartement d'axe en axe des essieux | | 4 ,000 |
| Diamètre de la circonférence décrite par l'extrémité des tampons | | 8 ,300 |

*Wagons à marchandises et à bestiaux.*

| | | |
|---|---|---|
| Longueur de dehors en dehors des tampons | | 7 ,460 |
| Largeur de dehors en dehors des tampons | | 2 ,100 |
| Largeur maxima de la caisse avec les deux portes | | 2 ,840 |
| Hauteur du rail au tablier (voiture chargée) | | 1 ,165 |
| Hauteur de la guérite au-dessus du rail (La guérite est placée au milieu de la caisse) | minima | 3 ,775 |
| | maxima | 3 ,805 |
| Écartement d'axe en axe des essieux | | 3 ,200 |
| Diamètre de la circonférence décrite par l'extrémité des tampons | | 7 ,656 |

*Wagons-écuries.*

| | | |
|---|---|---|
| Longueur du dehors en dehors des tampons | | 5 ,560 |
| Largeur du dehors en dehors des tampons | | 2 ,100 |
| Hauteur de la lanterne au-dessus du rail (La lanterne est placée au milieu de la caisse) | minima | 3 ,800 |
| | maxima | 3 ,840 |

| | |
|---|---|
| Écartement d'axe en axe des essieux. . . . . | $2^m$,600 |
| Diamètre de la circonférence décrite par l'extrémité des tampons. . . . . | 5 ,820 |

*Wagons plates-formes.*

| | |
|---|---|
| Longueur du dehors en dehors des tampons. . . . . | 7 ,460 |
| Largeur du dehors en dehors des tampons.. . . . . | 2 ,100 |
| Largeur maxima du wagon. . . . . | 3 ,100 |
| Hauteur du rail au tablier (voiture chargée). . . . . | 1 ,095 |
| Écartement d'axe en axe des essieux.. . . . . | 3 ,200 |
| Diamètre de la circonférence décrite par l'extrémité des tampons. . . . . | 7 ,656 |

*Wagons à bois.*

| | |
|---|---|
| Longueur de dehors en dehors des tampons. . . . . | 5 ,560 |
| Largeur de dehors en dehors des tampons. . . . . | 2 ,007 |
| Largeur maxima de la caisse. . . . . | 2 ,600 |
| Hauteur du rail au tablier (voiture chargée). . . . . | 1 ,095 |
| Écartement d'axe en axe des essieux . . . . . | 2 ,600 |
| Diamètre de la circonférence décrite par l'extrémité des tampons. . . . . | 5 ,820 |

**417.** *Pentes des routes aux abords des ponts.* S'il y a lieu de déplacer les routes existantes, la déclivité des pentes ou rampes ne pourra excéder $0^m$,03 pour les roues impériales et départementales, et $0^m$,05 pour les chemins vicinaux.

**418.** *Souterrains.* La largeur entre les pieds-droits (cah. des charges cité n° 416) est fixée à 8 mètres et la hauteur sous clef à $5^m$,50.

Il convient qu'un homme puisse se tenir debout sur l'impériale; or, les diligences les plus élevées ayant $2^m$,80, si l'on compte $2^m$,20 pour l'homme de grande taille avec son chapeau, on voit que la distance des rails à l'intrados ou aux sous-poutres doit être de 5 mètres au moins.

**419.** *Superficies occupées par les gares et ateliers.* Les gares de dépôt de matériaux d'entretien des chemins se plaçant en des points où la voie est au niveau du sol, et situés à proximité des lieux d'extraction, on ne peut en fixer l'étendue, et surtout l'éloignement.

Les gares pour voyageurs dépendent du nombre des voyageurs et surtout de celui des convois partant et arrivant. Quant aux gares de marchandises, leur surface dépend non-seulement du nombre de convois et de la quantité de marchandises, mais aussi de la nature de ces marchandises. Ainsi, les matériaux de construction et les bois à brûler occupent un vaste espace. De plus, les chemins de fer, pour soutenir la lutte avec la navigation, doivent pouvoir emmagasiner les marchandises pendant un certain temps.

La surface affectée aux gares a toujours été en augmentant, tant à cause de l'accroissement de mouvement que pour satisfaire aux exigences du public.

Surface des stations intermédiaires de seconde classe des chemins d'Alsace. Cette surface n'a pas varié : Bollwiller, 1,01 hect.; Erstein, 0,90 hect.; Benfeld, 1,00 hect. Les stations intermédiaires de première classe ont pour surface : Mulhouse, 2,88 hect.; Colmar, 2,12 hect.; Schélestadt, 2,42 hect.

Ces trois dernières stations ont l'importance des stations extrêmes de Strasbourg et de Bâle. La gare de Mulhouse renferme, en outre de ce qui est affecté au service ordinaire, une remise pour 4 locomotives, et une autre pour les wagons; un établissement complet pour les marchandises, dont le mouvement est considérable; enfin, un atelier de réparation de wagons avec ses dépendances.

*TABLEAU des surfaces occupées par les différents services dans quatre gares de Paris.*

| DÉTAILS. | EST. Gare de | | LYON. Gare de | | NORD. Gare de | | ORLÉANS. Gare de | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | voyag. | march. | voyag. | march. | voyag. | march. | voyag. | march. |
| | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. |
| Longueur totale de la grille d'entrée à la pointe des aiguilles. . . . . | 565 | 1300 | 420 | 1180 | 500 | 1050 | 500 | 1800 |
| Longueur totale moins la cour d'entrée. . . . . | 500 | » | 360 | » | 430 | » | 400 | » |
| Longueur des halles couvertes. . . . | 150 | » | 150 | » | 130 | » | 160 | » |
| Surface totale. . . . . | 53960 | 344800 | 64000 | 248000 | 79375 | 347800 | 37450 | 261190 |
| Partie de cette surface affectée aux ateliers, remises et dépendances, environ. . . . . | » | 80000 | » | 110000 | » | 140000 | » | 90000 |
| Voyageurs. Surface couverte. Bâtiments avec ou sans buffet. . . . | 5680 | » | 9430 | » | 5530 | » | 10800 | » |
| Voyageurs. Surface couverte. Halles à voyageurs, marquises intérieures, abris. . | 4500 | » | 9240 | » | 5760 | » | 9435 | » |
| Voyageurs. Surface découverte. Marquises extér., cours et latrines. | 375 | » | 1150 | » | 350 | » | 1100 | » |
| Voyageurs. Surface découverte. Trottoirs, cours et dépendances. . . | 9550 | » | 6600 | » | 3175 | » | 13450 | » |
| Marchandises. Surface couv. Halles ou hangars. | 2040 | 21755 | 2200 | 24500 | 2935 | 48950 | » | 31715 |
| Marchandises. Surface découverte. Quais. . . . . | » | 3975 | » | 1500 | » | 210 | » | 1500 |
| Marchandises. Surface découverte. Cours. . . . . | 2910 | 80025 | 3800 | 16100 | 4240 | 16550 | » | 38500 |
| Matériel. Surface couv. Ateliers, remises de locomotives et wagons. . . . . | 1720 | 21245 | 4000 | 20265 | 410 | 53849 | » | 25775 |
| Matériel. Surface découverte. Cours, parcs à roues, quais à coke. . . . . | » | 58755 | » | 85735 | » | 85051 | » | 63325 |
| Surface occupée par les voies. . . . | 20740 | 108945 | 27080 | 99900 | 45975 | 143190 | 2665 | 100375 |
| Parties non utilisées jusqu'à ce jour, ou divisées en jardins. . . . . | » | 50000 | » | » | 11000 | » | » | » |

*Mouvement dans les gares du tableau précédent.*

| DÉTAILS. | | | EST. | LYON. | NORD. | ORLÉANS. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Grande vitesse. | Voyageurs. | Nombre de trains par jour. | 34 | 32 | 76 | 32 |
| | | Nombre maximum de voyageurs en une journée. . | 4903 | 5322 | 10431 | » |
| | | Nombre moyen de voyageurs par jour. . . . . | 1742 | 1812 | 3750 | 1840 |
| | | Nombre maximum de voyageurs par train. . . . . | 1000 | 730 | 850 | » |
| | Bagages et messageries. | Maximum d'une journée en kilogrammes. . . . . | 39927 | 201858 | 97203 | » |
| | | Moyenne journalière.. . . | 26600 | 69388 | 41751 | 40242 |
| Petite vitesse. | Marchandises. | Nombre de trains par jour. | 32 | 12 | 31 | » |
| | | Maximum d'une journée en tonnes. . . . . | 2603 | 3252 | 4480 | » |
| | | Moyenne journalière en tonnes. . . . . | 1703 | 2140 | 2617 | 2000 |

Remarques sur les tableaux précédents : la gare d'Orléans, construite depuis longtemps, est beaucoup trop petite ; celle de l'Est est suffisante pour le chemin de Strasbourg et ses dépendances ; mais elle ne le sera probablement plus après l'ouverture de la ligne de Mulhouse.

A l'Est et au Nord, les bureaux de l'administration centrale sont dans les bâtiments de la gare, qui sont en général à deux étages. Aux chemins de Lyon et d'Orléans, il n'y a qu'un rez-de-chaussée, et les bureaux sont dans des bâtiments contigus à la gare.

De l'étude des gares du tableau précédent, MM. Perdonnet et Polonceau concluent pour les cas analogues :

1° Longueur de la gare proprement dite des voyageurs, non compris une cour antérieure et un bâtiment de tête, 360 à 430 mètres. La longueur, 150 à 160 mètres, des halles couvertes permet d'abriter un convoi de 20 voitures ; mais cette longueur doit être portée à 200 mètres.

2° Surface suffisante pour la gare des voyageurs, le service de la messagerie et de la marchandise à grande vitesse se faisant dans cette gare, 5,5 à 8 hectares.

3° Surface couverte pour le service des voyageurs seulement, 7500 mètres pour le bâtiment et 6300 mètres pour la halle, non compris les remises contiguës comme au chemin de Lyon.

4° Surface découverte pour chacune des cours d'arrivée et de départ, 3000 à 3500 mèt.

5° Surface couverte pour le service de la messagerie et de la marchandise à grande vitesse, 2000 à 3000 mètres. Surface découverte, 2000 à 4000 mètres.

6° La surface couverte et celle découverte, pour le service du matériel, varient avec la distance du dépôt.

7° Surface couverte pour le service de la marchandise à petite vitesse, 25000 à 40000 mètres. Surface découverte, au moins 17000 mètres, dont une partie en trottoirs.

8° Surface des grands ateliers de réparation, 13 à 14 hectares, comme au Nord, dont 2,5 à 3 hectares au moins sont couverts.

9° Surface occupée par les voies dans les grandes gares de marchandises, 10 à 15 hectares.

10° La surface totale des grandes gares de marchandises n'est pas inférieure à 25 hectares, et elle s'élèvera prochainement à 44 hectares pour le chemin du Nord.

*PRIX approximatif, par mètre carré, des stations de la Compagnie des chemins de fer du Nord.*

| CONSTRUCTIONS. | 1er. Gares de tête de ligne. Paris et La Chapelle. | | 2e. Gares d'embranchement principal. Amiens et Lille. | | 3e. Gares de tête de ligne. Dunkerque et Calais. | | 4e. Stations nº 1. Creil, Arras, Douai. | | 5e. Stations nº 2. Pontoise, Compiègne, Noyon, Chauny, Clermont, etc. | | 6e. Stations nº 3. Franconville, Beaumont, Pont-St-Maxence, Saint-Just, etc. | | 7e. Stations nº 4. Thourotte, Apilly, Ourscamp, Boileux, etc. | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | surface. | prix. | surface. | prix. | surface. | prix. | surface. | prix. | surface. | prix. | surface. | prix. | surface. | prix. |
| | m.c. | fr. | m.c. | fr. | m.c. | fr. | m.c. | fr. | m.c. | fr. | m.c. | fr. | m.c. | fr. |
| (1) Bâtiment principal. . . . des voyageurs. | 5 000 | 300 | 5 450 | 200 | 1 300 | 200 | 680 | 150 | 145 | 172 | 102 | 100 | 84 | 100 |
| (1) Bâtiment principal. . . . des employés. | | | | | | | | 220 | 100 | 250 | 168 | 100 | » | » |
| (2) Halles couvertes. . . . . | 6 000 | 66.66 | 4 200 | 71.43 | 1 400 | 57.15 | 1 000 | 55 | » | » | » | » | » | » |
| Marquises. . . . . | » | » | » | » | » | » | » | » | 210 | 47.60 | 105 | 47.60 | » | » |
| (3) Halles à marchandises. . . . | 12 600 | 55.55 | 6 240 | 56.40 | 1 360 | 58.80 | 880 | 56.80 | 520 | 57.70 | 320 | 62.50 | » | » |
| (4) Latrines. . . . . | » | » | » | » | » | » | 40 | 250 | 36 | 139 | 30 | 83 | » | » |
| (5) Dépôts. . . . compris ateliers et magasins. . | 14 278 | 126.10 | 4 268 | 128.85 | 682 | 95.30 | » | » | » | » | » | » | » | » |
| (5) Dépôts. . . . sans ateliers. . . | » | » | » | » | » | » | 375 | 93.33 | 187 | 96.25 | » | » | » | » |
| (6) Remises de wagons. . . avec ateliers de réparations. . | 10 000 | 50 | 3 321 | 82.80 | » | » | » | » | » | » | » | » | » | » |
| (6) Remises de wagons. . . sans ateliers. . . | » | » | » | » | » | 45 | 375 | 53.33 | 187 | 53.45 | » | » | » | » |
| Réservoirs. . . . . | 160 | 200 | 160 | 200 | 160 | 200 | 130 | 200 | 130 | 200 | » | » | » | » |
| Quais de voitures. à 2 quais. . . | 2 000 | 8 | 2 130 | 8 | » | » | » | » | » | » | » | » | » | » |
| Quais de voitures. à 1 quai. . . . | » | » | » | » | 1 000 | (a) | 1 000 | (a) | 1 000 | (a) | » | » | » | » |
| Quais de voyageurs. . . . . | 2 200 | 8 | 2 500 | 8 | 1 000 | (a) | 1 000 | (a) | 800 | (a) | 1 150 | (a) | 1 100 | (a) |

(1) Paris, Amiens, Calais, Creil, Arras, Douai, Compiègne, Chauny, Franconville, Saint-Juste, Boves, Armentières.
(2) Lille, Calais, Douai, Saint-Quentin.
(3) La Chapelle, Lille, Dunkerque.
(4) Compiègne.
(5) La Chapelle, Amiens, Dunkerque, Noyon.
(6) La Chapelle, Amiens, Dunkerque, Hazebrouck.
(a) Le prix moyen des quais pavés ou dallés est de 8 fr. par mètre.

*PRIX du mètre carré des bâtiments de chemins de fer* (Nouvelles Annales de la construction).

| | CHEMIN de fer du Nord. | GARE de Clermont-Ferrand. |
|---|---|---|
| | fr. | fr. |
| Bâtiments à un étage | 250.00 | 213.00 |
| *Id.* à rez-de-chaussée | 150.00 | 113.00 |
| *Id.* des voyageurs, en moyenne | » | 126.00 |
| Halles de marchandises | 55.00 | 61.58 |
| Halle couverte | » | 57.35 |
| Trottoirs | » | 8.76 |
| Quais découverts | 8.00 | 9.30 |
| Remises des voitures | 50.00 | 46.65 |
| *Id.* par voiture | 1 550.00 | 1 370.00 |
| Dépôts des locomotives | » | 66.13 |
| *Id.* par machine | 12 00.000 | 12 476.00 |

**420.** *Chaussée sur déblai.* Sur un terrain solide, on fait immédiatement la fouille jusqu'à la profondeur de $0^m,50$ ou $0^m,60$ au-dessous du niveau des rails, en inclinant le fond de $0^m,03$ par mètre à partir de l'axe vers l'un ou l'autre côté. On construit ensuite, parallèlement à l'axe, deux murs en pierre sèche qui séparent la chaussée du fossé; on donne à ces murs une hauteur égale à celle de la chaussée et un fruit de 1/10 du côté du fossé. Sur le fond de l'espace intercepté par ces murs, on étale une couche de $0^m,25$ d'épaisseur de sable, de pierres concassées, de menu charbon ou de toute autre matière perméable et légèrement élastique; sur cette couche, on place les dés ou les traverses qui doivent supporter les coussinets. Les coussinets posés, on y ajuste les rails, que l'on fixe par des coins de bois, et on remplit l'intervalle entre les dés ou les traverses, jusqu'au niveau de la face supérieure des murs en pierre sèche, avec la matière employée pour le fond de la chaussée. Il importe que les dés, et surtout les traverses, soient bien enveloppés de cette matière, laquelle, étant bien pilonnée tout autour, les empêche jusqu'à un certain point de se déranger, et contribue puissamment à leur conservation.

Dans les tranchées, on peut employer les dés ou les traverses; mais on préfère ces dernières, qui sont plus élastiques, maintiennent bien parallèles les deux lignes de rails et sont plus faciles à relever. Il n'y a que le prix qui, dans certaines localités, peut faire employer les dés (424).

**421.** *Chaussée sur remblai.* Si le terrain est solide, la chaussée se construit comme dans le numéro précédent, sauf la plus grande largeur des accotements (414). Il n'est pas nécessaire de bomber la surface qui

supporte la matière perméable et élastique, l'inégalité de tassement du remblai la bombe naturellement.

Les dés sont prohibés sur remblai, on n'y emploie exclusivement que les traverses en bois (425).

422. *Chaussée sur un terrain marécageux.* Après avoir desséché le terrain, si cela est possible économiquement, on retombe dans les cas précédents.

Si le terrain marécageux a peu de profondeur, et qu'on ne veuille ou qu'on ne puisse pas le dessécher, on enfonce des pilots qui pénètrent jusqu'à une profondeur convenable dans le terrain solide (125 et suivants); on réunit la tête de ces pieux par des longrines sur lesquelles on pose des traversines, et sur ces traversines on place de nouveaux cours de longrines qui portent les rails.

Si le marais est très-profond, on dessèche, au moyen de fossés parallèles, une couche de $0^m,40$ à $0^m,50$ d'épaisseur. Sur cette bande de terrain, on repose des fascines que l'on recouvre d'un lit de pierrailles. On place ensuite, comme dans le cas précédent, des cours de longrines, des traversines et les longrines qui supportent les rails.

Au chemin de fer de Versailles (rive gauche), pour fonder sur un terrain sablonneux aquifère d'une profondeur considérable, on a enfoncé le long de chacun des talus deux cours de palplanches éloignés de 1 mètre; on a vidé les terres entre ces palplanches, et on les a remplacées par des murs en pierres sèches. On a ensuite enlevé la couche de terrain ainsi desséchée entre les deux fossés, et sur le fond de cette nouvelle excavation on a posé avec soin un lit de grosses pierres; sur ce premier lit, on en a étendu quelquefois un second et même un troisième en pierres moins grosses, et sur ces pierres on a établi la chaussée en sable de $0^m,50$ d'épaisseur (420).

423. *Sable et pierres concassées.* Le sable doit être composé de grains de grosseur moyenne et assez durs pour ne pas être facilement écrasés.

Il en faut au moins 4 mètres cubes par mètre courant de chaussée, sans compter ce que l'on consomme dans les premiers temps pour relever la voie.

Le prix du sable est très-variable; il dépend surtout de la distance de la carrière au point où il est employé. A la carrière, il coûte ordinairement de 0 fr. 50 c. à 0 fr. 75 c. le mètre cube; au lieu que rendu sur le chemin de fer, il a coûté 2 fr. au chemin de Saint-Germain; au chemin de fer de Versailles (rive gauche), sans que la distance de transport soit très-considérable, il a coûté 4 fr., 4 fr. 50 c. et jusqu'à 6 et 7 fr. le mètre cube; au chemin de fer de Lille à la frontière belge, il a coûté jusqu'à 12 fr., et en moyenne 8 fr. 40 c.

Les pierres concassées employées à la construction de la chaussée doivent être d'égale dureté et pouvoir, comme le sable, résister à l'écrasement. Il faut rejeter celles que la gelée réduirait en poussière.

**424.** *Dés.* Les dés peuvent être d'une pierre quelconque, mais ni trop tendre ni trop gélive. Sur les chemins anglais, ils n'ont pas moins de $0^m,60$ de côté sur $0^m,30$ de hauteur. A l'exception de la face supérieure, que l'on dresse légèrement pour recevoir le coussinet, les autres faces sont brutes ou à peu près. Une plaquette de carton goudronné ou de bois interposée entre le dé et le patin du coussinet donne de l'élasticité au chemin.

**425.** *Traverses* (d'après le cahier des charges du chemin de fer de Strasbourg). Les traverses à fournir seront en bois de chêne neuf, sans pourriture, nœuds vicieux, gélivure, roulure ni piqûre; de l'espèce la plus dure et la plus dense, et abattu en bonne saison, c'est-à-dire du 15 octobre au 15 mars. Ces traverses n'auront pas plus de deux ans d'abatage.

Les traverses seront équarries ou demi-rondes.

Les traverses équarries auront les quatre faces dressées à la scie ou à la cognée, sans sujétion de vive arête sur l'une des faces seulement, et sans que la flache ait plus de 4 centimètres.

Les traverses demi-rondes seront débitées dans les bois fendus en deux à la scie, par conséquent leur épaisseur sera moitié de leur largeur; elles seront complétement dépourvues d'écorce.

Le nombre des traverses de joint sera à celui des traverses intermédiaires dans le rapport de 1 à 3.

Voir le tableau suivant pour les dimensions des traverses.

Sur ces dimensions, et sur un quart de la fourniture seulement, on admettra les tolérances indiquées au tableau. Il est évident que les tolérances sur la longueur devront se compenser, c'est-à-dire qu'il y aura autant de traverses avec la tolérance en plus qu'avec la tolérance en moins.

En mesurant l'épaisseur et la largeur, on ne tiendra pas compte de l'aubier.

Les traverses seront droites sur les deux faces horizontales, et dans l'autre sens, on n'y tolérera pas de courbure dont la flèche dépasserait 10 centimètres.

*TABLEAU des dimensions normales des traverses et des tolérances sur divers chemins.*

| CHEMINS. | LONGUEUR de toutes les traverses. | ÉPAISSEUR AU MILIEU, aubier déduit. | | | | LARGEUR. | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Traverses équarries. | | Traverses demi-rondes. | | Traverses équarries. | | Traverses demi-rondes. | |
| | | de joint. | in-term. | de joint. | in-term. | de joint. | in-term. | de joint. | in-term. |
| | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. |
| Paris à Strasbourg. . . | 2.65 | 0.15 | 0.15 | 0.18 | 0.165 | 0.33 | 0.28 | 0.36 | 0.33 |
| Paris à Lyon. . . . . | 2.80 | 0.17 | 0.15 | 0.17 | 0.15 | 0.35 | 0.21 | 0.35 | » |
| Tours à Nantes. . . . . | 2.75 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | » | 0.28 | 0.32 | 0.22 |
| Orléans à Vierzon. . . . | 2.60 | 0.15 | 0.14 | 0.15 | 0.15 | 0.32 | 0.22 | 0.32 | 0.22 |
| Amiens à Boulogne. . . | 2.55 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | 0.15 | » | 0.21 | » | 0.21 |

| CHEMINS. | Tolérance en plus ou en moins. | | | | | | TOLÉRANCE sur la courbure. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | sur la longueur. | | sur la largeur. | | sur l'épaisseur. | | |
| | Équarries. | Demi-rondes. | Équarries. | Demi-rondes. | Équarries. | Demi-rondes. | |
| | m. | m. | m. | m. | m. | m. | |
| Paris à Strasbourg. . . | 0.10 | 0.10 | 0.04 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 1/26 |
| Paris à Lyon. . . . . | 0.10 | 0.10 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 0.02 | 1/20 |
| Tours à Nantes. . . . . | 0.15 | 0.15 | 0.04 | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 1/15 |
| Orléans à Vierzon. . . . | 0.25 | 0.25 | 0.04 | 0.04 | 0.02 | 0.02 | 1/20 |
| Amiens à Boulogne. . . | 0.15 | 0.15 | 0.02 | 0.02 | 0.01 | 0.01 | 1/20 |

Il paraît nécessaire, pour éviter les fortes vibrations, que les traverses dépassent l'axe du rail de $0^m,60$ au moins; ce qui porte leur longueur à $2^m,70$ pour les voies de $1^m,50$.

Lorsque l'aubier est payé, le cahier des charges stipule ordinairement un maximum pour l'épaisseur.

Les bois pour traverses doivent être coupés du 15 octobre au 15 mars, et ils ne doivent pas avoir plus de deux ans de coupe. Pour des traverses des roues hydrauliques, etc., on peut employer le bois de chêne presque immédiatement après l'abatage; pour la charpente et la menuiserie, il doit avoir au moins une année de coupe.

Pour le chemin de Paris à Strasbourg, le stère de bois débité et rendu sur place a coûté 70 fr. entre Nancy et Strasbourg, 74 fr. entre Paris et Châlons et de Metz à Nancy; sur le chemin de Lyon, il a coûté 73 fr.,

et sur celui de Tours à Nantes, 57 fr. Pour la section de Calais à Lille et de Lille à Dunkerque, le sapin de Stettin est revenu à 50 fr. le stère rendu au port de Dunkerque ou de Calais, mais non débité. Les traverses sont triangulaires et le bois injecté. En 1852, pour le chemin de Metz à Thionville, les traverses n'ont coûté que 44 fr. le mètre cube; à Metz, ce prix est aujourd'hui de 50 fr. Les traverses payées 75 fr. à Paris en 1854 se vendent 55 fr. près de Vesoul.

Pour calculer le prix de la traverse remplissant les conditions du cahier des charges, en partant de celui du mètre cube de bois, on a supposé au chemin de Strasbourg que les livraisons se composent de moitié traverses équarries et moitié demi-rondes; mais le fournisseur n'en était pas moins libre de donner telle proportion qui lui convenait d'équarries ou de demi-rondes. En supposant 70 fr. pour le prix du mètre cube, on trouve par cette méthode 9 fr. 20 c. pour la traverse de joint, et 7 fr. 75 c. pour la traverse intermédiaire. On évite ainsi l'opération du cubage.

Les traverses demi-rondes s'obtiennent par un trait de scie suivant l'axe d'un rondin, et celles triangulaires par deux traits de scie, suivant les diagonales d'une pièce équarrie. Les premières reposent sur le ballast par leur surface plane, et les secondes par une arête : ces dernières pèchent par la stabilité.

Les traverses en chêne de bonne qualité, purgées d'aubier et bien enveloppées de ballast, paraissent durer longtemps. Ainsi, au chemin de fer de Versailles (rive gauche), ouvert en 1839, et où le bois était de bonne qualité, M. Bergeron a constaté, en 1846, que toutes les traverses bien enterrées, celles surtout qui reposaient sur du sable un peu gras, étaient en aussi bon état que le jour qu'on les a posées.

En 1846, de Paris à Clamart, pour une longueur de 14750 mètres, on n'avait encore remplacé que cinquante traverses environ. La plupart ont été mises à la réforme, parce qu'elles étaient fendues dans la longueur suivant les trous des chevillettes, ou n'étaient composées que d'aubier entièrement décomposé. Le chef poseur a déclaré que sur cette section quarante nouvelles traverses environ devaient être bientôt remplacées. De Clamart à Bellevue (3127 mètres), les nombres des traverses remplacées et en mauvais état n'étaient que quinze et trente; de Bellevue à Chaville (4100 mètres), ces nombres étaient dix et vingt, et de Chaville à Versailles (4900 mètres), huit et vingt.

Il est à remarquer que les traverses, avant leur pose définitive, avaient déjà servi pendant deux ans aux terrassements.

Le grand nombre de traverses fendues de la première section doit être attribué à ce que la longueur de $2^m,20$ à $2^m,40$ des traverses était insuffisante.

M. Polonceau avait déjà remarqué au chemin de Strasbourg à Bâle que les traverses bien enveloppées de sable se sont bien conservées.

La préparation par le sublimé corrosif (procédé de Kyan), générale-

ment préférée il y a quelques années, est aujourd'hui abandonnée. Il paraîtrait, au dire de quelques ingénieurs anglais, que le sublimé ne prolonge pas de plus d'une année la durée du bois. On a remplacé le sublimé corrosif par la créosote impure (huile obtenue par la distillation du goudron et ne contenant pas plus de 1 à 2 pour 100 de créosote), par le sulfate de cuivre, le sulfate de fer, le pyrolignite de fer, le chlorure de zinc, et par le mélange de sulfure de barium et de sulfate de fer.

La créosote est le réactif auquel les ingénieurs anglais les plus célèbres donnent la préférence. Le chêne en absorbe une plus grande quantité que le sapin.

Les sapins du Nord, de bonne qualité, employés pour traverses en Angleterre, ne paraissent pas durer plus de trois ans quand ils n'ont pas été préalablement injectés. Les traverses en mélèze, que l'on emploie quelquefois en Angleterre, paraissent durer de douze à quatorze ans, même sans avoir été préparées (Booth).

MM. Brunel et Stephenson, ainsi que M. Henner, chargé spécialement de la préparation des bois sur le chemin de Bristol, s'accordent pour déclarer qu'en préparant les traverses par la créosote, on peut employer des bois de qualité inférieure, tels, par exemple, que certains pins d'Écosse à tissu grossier et lâche.

La créosote impure, employée en Angleterre pour la préparation des traverses, est extraite du goudron de houille, produit des usines à gaz. On retire environ de 30 à 40 de créosote pour 100 de goudron. Le résidu est pour ainsi dire sans valeur.

Le goudron coûte en Angleterre 1 à 1,5 denier (10 à 15 cent.) le gallon (4,54 litres); lorsqu'il coûte 1 denier, la créosote revient à 3,5 deniers.

L'absorption est de 1 gallon de créosote par pied cube de bois.

Lorsque la créosote est rare, on y mêle moitié de son poids de pyrolignite de fer et d'eau. Mais on reproche aux dissolutions métalliques de diminuer l'élasticité des bois et de les rendre plus sujets à se fendre.

En Angleterre, le procédé assez généralement adopté pour créosoter les bois consiste à remplir de bois un grand cylindre en fonte dans lequel on fait passer de la vapeur pendant un certain temps; cette vapeur, en amollissant le bois, facilite la sortie de la séve, et, en se condensant, elle produit un vide partiel, que l'on rend plus complet par l'action de pompes à air. On met alors le cylindre en communication avec un bassin rempli de créosote chauffée à 90° Fareinheit (252). Ce réactif s'introduit naturellement dans les pores du bois vides d'air. On foule ensuite au moyen de pompes jusqu'à une pression de 10 atmosphères environ. Le bois reste sous cette pression pendant 3 heures avant de le retirer. On opère ainsi sur trois charges en 24 heures.

Quelquefois on ne fait pas le vide dans le cylindre; on ne chauffe que faiblement la créosote en opérant sous une pression de 8 atmosphères, et on laisse les traverses séjourner pendant 8 heures dans le réactif. Le

premier procédé est préférable. L'augmentation de poids des traverses est d'environ 9 livres par pied cube.

L'expérience paraît avoir démontré que le procédé de M. Margary était le plus simple, le plus économique et le plus certain. Il consiste en une dissolution de 1 kilog. de sulfate de cuivre pour 60 kilog. d'eau, dans laquelle on immerge les bois pendant 2 jours par chaque pouce d'épaisseur, c'est-à-dire pendant 20 jours pour une traverse de $0^m,25$ d'épaisseur. En hiver, cette durée paraît être un peu faible.

Au chemin d'Amiens à Boulogne, on a employé 18 kilog. de sulfate de cuivre par mètre cube d'eau.

Des bois blancs, pénétrés de sulfate de cuivre, et placés dans le sol comme les traverses des chemins de fer, ou exposés à l'action des agents atmosphériques, se sont mieux conservés que le chêne placé dans les mêmes circonstances.

Une simple immersion du bois n'a pas toujours paru suffisante, et on a eu recours à la compression ou à l'aspiration pour faire pénétrer le liquide (procédé de M. Bréant).

Un procédé, dû à M. Bethell, consiste à injecter les bois avec du sulfate de cuivre ou tout autre antiseptique dans le cylindre ordinairement employé à cet effet; à le dessécher ensuite dans une étuve, de manière à ne laisser dans le bois que le sel cristallisé ou combiné avec l'albumine; enfin, à le plonger, au sortir de l'étuve, dans une chaudière contenant du goudron brut. Cette préparation, suivant M. Bethell, ne reviendrait pas à plus de 11 francs par mètre cube.

426. *Coussinets et éclisses.* Les coussinets doivent être parfaitement conformes au modèle envoyé par la compagnie du chemin de fer (432). Ce modèle doit coïncider exactement avec les faces du rail, avec lesquelles il doit être en contact, et, afin que tous les coussinets jouissent de la même propriété, il convient de les mouler avec un modèle métallique bien dressé et bien ajusté sur le rail; c'est ainsi que MM. Ransome et May, fondeurs d'Ipswich, ont moulé les coussinets du chemin de Londres à Douvres, d'après le modèle de M. W. Cubitt. Cet ingénieur a placé les trous des chevillettes non sur une même ligne normale à l'axe du coussinet, afin qu'il y ait moins de tendance à fendre les traverses en enfonçant les chevillettes; cette disposition a été employée au chemin d'Amiens à Boulogne, où l'on a arrondi les extrémités du patin, qui n'est pas alors rectangulaire.

Le rail est en contact avec le coussinet par toute sa face inférieure; mais la face non située du côté du coin ne porte souvent contre la joue du coussinet qu'à la partie inférieure, et sur une hauteur de $0^m,01$ environ à la partie supérieure.

Les coussinets doivent être en fonte grise, à grain serré et tenace; ils doivent être exempts de soufflures, gouttes froides et autres défauts du même genre.

La difficulté d'obtenir une marche régulière d'un haut fourneau, et, par suite, des produits toujours d'une bonne qualité, devrait ne faire employer, comme aux chemins de fer de Saint-Germain, de Versailles (rive gauche et rive droite) et d'Orléans, que de la fonte de seconde fusion; cependant le gouvernement français, à l'imitation du gouvernement belge, a admis, pour les chemins de fer de l'État, les coussinets de fonte de première fusion aussi bien que ceux de fonte de seconde fusion. La fonte au bois ayant les qualités requises peut être employée en première fusion; celle au coke est généralement de seconde fusion.

On juge de la qualité des coussinets en en cassant quelques-uns pris au hasard dans chaque fourniture; mais, comme il est à craindre qu'on ne les coule avec des fontes provenant de hauts fourneaux marchant à l'air chaud, qui, quoique d'une faible ténacité, présentent un grain satisfaisant, le gouvernement prescrit, avec raison, des essais à faire sur la fonte qui sert à les couler; la résistance absolue doit être de 1500 kilog. au moins par centimètre carré de section (216).

La tolérance admise pour le poids des coussinets, dans le cahier des charges de l'État, est de 3 pour 100. Au chemin de fer de Strasbourg, elle a été réduite à 2 pour 100. D'un autre côté, on a réduit de 1500 à 1300 kilog. l'effort de traction par centimètre carré que la fonte du coussinet doit supporter avant de rompre.

La fonte doit être non-seulement tenace, mais aussi elle doit résister au choc; il conviendrait d'indiquer un essai qui assurât de cette qualité.

L'ingénieur peut rejeter la totalité des coussinets quand il y en a 1/7 de mauvais, et la compagnie a droit aux dommages-intérêts qui ont été fixés à l'avance.

La compagnie du chemin de fer a à l'usine un agent de son choix, chargé de surveiller la fabrication des coussinets, et qui en fait arrêter le coulage si l'allure du haut fourneau se dérange; mais, malgré cette précaution et tous les soins que l'on peut prendre pour s'assurer de la bonne qualité des coussinets, le fournisseur doit encore garantir sa marchandise pendant une année de service.

Aux chemins de fer de Saint-Germain, de Versailles et d'Orléans, les coussinets, fournis en grande partie par l'usine de Fourchambault, ont coûté de 300 à 340 fr. la tonne de 1000 kilog. rendue à Paris.

Pour le chemin de fer de Versailles à Chartres (1847), la fourniture de 300000 coussinets, divisés en 4 lots, a été adjugée : les 1er et 3e lots, à M. Mertian, de Montataire (Oise), aux prix de 208f,40 et 215 fr. la tonne rendue sur la ligne; le 2e lot, à M. Gendarme, de Charleville (Ardennes), au prix de 224f,90; et le 4e à M. Lemonissen, de Saint-Dizier (Haute-Marne), au prix de 222f,35.

En 1854, pour la ligne de Mulhouse, les coussinets ont coûté 200 fr. la tonne.

*TABLEAU des poids et dimensions principales des coussinets de quelques chemins de fer* (tableau page 558) (*).

| COUSSINETS. | | Paris à Orléans. | Paris à Rouen. | Du Nord. | Montereau à Troyes. | Paris à Strasbourg. | Londres à Birmingham. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Poids du coussinet. | intermédiaire | 9k.20 | 9k.50 | 8k.50 | 8k.00 | 10k.30 | 11k.70 |
| | de joint | » | » | 11 .35 | 11 .30 | 12 .30 | » |
| Patin. | Longueur, suivant celle du rail. de joint. | 0m.104 | 0m.116 | 0m.105 | 0m.110 | 0m.110 | 0m.125 |
| | Longueur, suivant celle du rail. interm. | » | » | 0 .130 | 0 .133 | 0 .150a | » |
| | Largeur, suivant celle du rail. | 0 .245 | 0 .240 | 0 .250 | 0 .305b | 0 .270 | 0 .270 |
| | Épaisseur entre les deux nervures, aux trous des chevillettes g | 0 .033 | 0 .030 | 0 .030 | 0 .037 | 0 .032 | 0 .029 |
| | Épaisseur sous le rail | 0 .045 | 0 .042 | 0 .040 | 0 .041 | 0 .045 | 0 .045 |
| Joue intérieure. | Épaisseur au bas | 0 .020 | 0 .020 | 0 .018 | 0 .022 | 0 .030 | 0 .030h |
| | Épaisseur en haut | 0 .010 | 0 .016 | 0 .016 | 0 .015 | 0 .015 | 0 .018 |
| Joue extérieure. | Épaisseur au bas | 0 .027 | 0 .032 | 0 .019 | » | » | 0 .024 |
| | Épaisseur en haut | 0 .011 | 0 .016 | 0 .015 | » | » | 0 .016 |
| | Hauteur, depuis le dessous du patin i | 0 .130 | 0 .132 | 0 .130 | 0 .135 | 0 .135 | 0 .138 |
| Section transversale des coins. | Dimension maxima horizontale | 0 .045 | 0 .045 | 0 .051 | 0 .047 | 0 .050 | 0 .048 |
| | Dimension maxima verticale | 0 .073 | 0 .054 | 0 .068 | 0 .060 | 0 .060 | 0 .048 |
| Trous des chevillettes. | Diamètre en haut | 0 .020 | 0 .021 | moyen. | 0 .030n | moyen. | 0 .020 |
| | Diamètre au bas | 0 .019 | 0 .019 | 0 .020 | 0 .0305 | 0 .020 | 0 .022 |
| Longueur moyenne des joues ou de la surface de serrage (suivant la longueur du rail) | | 0 .075 | 0 .088 | 0 .079 | 0 .070 | 0 .078 | 0 .070 |
| *Id.* pour le coussinet de joint | | » | » | 0 .105 | 0 .100 | 0 .110 | » |
| Ouverture horizontale entre les parties supérieures des joues | | 0 .06 | 0 .065 | 0 .061 | 0 .054 | 0 .056 | 0 .065 |
| Hauteur totale du dessus du rail au-dessous du patin | | 0 .159 | 0 .169 | 0 .155 | 0 .160 | 0 .175 | 0 .171 |

(*) A l'exception des dimensions suivant la longueur du rail, toutes les autres sont les mêmes, ou à peu près, pour les coussinets de joint que pour les coussinets intermédiaires.

*a* cette longueur 0m,15 ne subsiste qu'au milieu du coussinet sur une largeur de 0m,14; aux extrémités, la longueur est égale à celle uniforme 0m,11 du coussinet intermédiaire;

*b* ce patin n'est pas rectangulaire; il est à peu près demi-circulaire aux extrémités;

*g* quelquefois cette épaisseur n'existe qu'à l'emplacement des trous, et on la diminue un peu ailleurs, de manière à avoir une rondelle en saillie autour du dessus de chaque trou. Sur le chemin de Montereau à Troyes, le dessous du patin est refouillé, de manière qu'il ne repose sur la traverse que par une bande qui règne sur tout son pourtour. Cette disposition a également été employée sur les chemins de fer d'Amiens à Boulogne et de Fampoux à Hazebrouck;

*h* le coin est du côté de la nervure la moins élevée;

*i* la joue intérieure est de 0m,01 environ moins élevée que la joue extérieure, afin qu'elle ne touche pas aux rebords des roues; elle est également élevée au chemin de Paris à Rouen. Chaque joue intérieure et extérieure est contenue par deux nervures qui s'élèvent jusqu'à sa partie supérieure;

*n* les chevillettes sont en bois.

Les dimensions données pour le patin sont prises pour la face inférieure; les faces latérales sont inclinées de manière à réduire les dimensions de la face supérieure, de laquelle partent les joues et les nervures, qui vont un peu en s'amincissant de bas en haut.

Sur quelques lignes d'Angleterre, on emploie des coussinets dont le poids s'élève jusqu'à 18 kilog.

L'accident de Fampoux étant attribué par plusieurs personnes à l'absence d'un coin dans l'un des coussinets de joint, M. Edwards, ex-ingénieur en chef du matériel du chemin de fer de Paris à Strasbourg, a imaginé de placer au joint un coin supplémentaire en fer.

Fig. 72.



Dans la figure 72, qui représente, à l'échelle de 1/8, la coupe et le plan d'un coussinet intermédiaire, la partie non hachée est la modification apportée pour le coussinet de joint.

*b* ergot venu à la fonte, aux extrémités duquel sont des nervures également venues à la fonte;

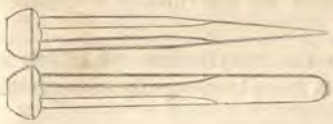
*a* coin ou prisonnier en fer que l'on enfonce entre le rail et l'ergot, et qui est maintenu latéralement par les nervures de l'ergot.

Depuis quelque temps, on fait beaucoup usage d'*éclisses*. Ce sont deux barres de fer laminé que l'on place une de chaque côté des rails, et qui servent à amener et à maintenir dans l'affleurement les extrémités voisines des rails. Ces éclisses ont environ $0^m,40$ de longueur; elles sont réunies par 4 boulons de $0^m,02$ de diamètre, qui traversent les rails; leurs trous sont ovalisés de $0^m,004$ dans les rails, afin de permettre la dilatation. Avec cette disposition, il n'y a plus de coussinets aux joints; mais on a soin de n'espacer que de $0^m,70$ à $0^m,80$ les coussinets qui en sont voisins. Quelquefois les éclisses forment coussinets de joints: elles sont encore en fer laminé, et chacune porte moitié du patin. 4 chevillettes à crochet, deux de chaque côté du patin, fixent celui-ci sur la traverse.

**427.** *Chevillettes.* Elles sont en fer de seconde qualité, et on les essaye en en ployant quelques-unes sous un angle de 45° et en les redressant ensuite; à cette opération, qui se fait à froid, à l'aide d'un marteau, elles ne doivent ni se rompre ni se criquer. La tête doit être refoulée, et non rapportée et soudée; elle sauterait quand on la frappe avec la masse pour enfoncer la chevillette. Il convient même, à l'essai, de la frapper avec le marteau en cherchant à la faire sauter.

La fig. 73 représente au 1/5 la chevillette du chemin de fer de Paris à Strasbourg.

Fig. 73.



*Extrait du cahier des charges pour le chemin de fer de Paris à Strasbourg.* Les formes et dimensions des chevilles seront exactement conformes aux modèles poinçonnés qui seront remis au fournisseur par la compagnie.

Le poids de la cheville, qui doit être de 0k,300, sera constaté contradictoirement, aussitôt après la fabrication des premières chevilles.

A la réception, il sera accordé sur ce poids constaté une tolérance de 2 pour 100 en plus ou en moins sur chaque cheville; mais la fourniture totale ne devra pas s'écarter de plus de 1 pour 100 du poids de 300 gr. par cheville. Dans ces limites, la compagnie payera le poids réel; l'excédant, s'il y en a, ne sera pas payé au fournisseur.

Il ne sera accordé aucune tolérance, ni en plus ni en moins, sur le diamètre des 5 premiers centimètres de la longueur de la cheville, immédiatement sous la tête de la cheville.

Deux gabarits en acier trempés et poinçonnés par la compagnie seront remis aux fournisseurs. Toute cheville qui n'entrera pas jusqu'à la tête dans le plus grand, ainsi que toutes celles qui entreront jusqu'à la tête dans le plus petit, seront rejetées.

Les chevilles seront en fer de bonne qualité, doux et nerveux. La tête sera refoulée dans la masse et non rapportée.

L'épreuve consistera à enfoncer la chevillette dans un bloc de chêne jusqu'à la moitié de sa longueur, et à frapper latéralement dans la partie supérieure, de manière à lui faire faire un angle de 45° avec la partie verticale enfoncée dans le bloc. Lorsqu'un dixième des chevilles soumises à cette épreuve aura cassé, ou aura été détérioré, la totalité de la fourniture présentée pourra être refusée.

Outre les chevilles rebutées à leur réception à l'usine, celles qui, à l'emploi, seront reconnues inadmissibles, ou par défaut de qualité, ou par excès de dimensions seront rejetées et remplacées par le fournisseur et à ses frais.

La fourniture de 150 000 chevillettes, pour le chemin de Paris à Rennes, a été adjugée à M. Leclerc, de Valenciennes, au prix de 414 fr. la tonne.

L'oxydation est un grave inconvénient des chevillettes en fer. Au chemin de fer de Manchester à Liverpool, après un service de plusieurs années, une chevillette, qui dans l'origine avait 0m,019 de diamètre, a été réduite à 0m,009 seulement, tandis que le diamètre du trou du coussinet s'est agrandi de 4 millimètres; on conçoit combien ces 14 millimètres de jeu devaient rendre faciles les vibrations de la voie et hâter la destruction du matériel.

MM. Ransome et May remplacent les chevillettes en fer par celles en bois, qu'ils taillent suivant les fibres du bois dans des morceaux de cœur de chêne. Ils commencent par leur donner, sur le tour, des dimensions plus grandes que celles qu'elles doivent avoir une fois terminées; ils les forcent dans des moules en fonte dont les dimensions intérieures sont celles des chevillettes préparées, et avant de les retirer du moule, ils les exposent pendan une demi-heure à l'action de la vapeur, à une température suffisante pour opérer une espèce de fusion de la résine et de la séve que contient le bois; laissant ensuite refroidir le moule, le bois a acquis une compression presque permanente, et il

n'offre plus les inconvénients de gonflement et de contraction suivant les circonstances atmosphériques comme les chevillettes ordinaires en bois.

Par la compression, le volume de ces chevillettes est réduit à 63 pour 100 de son volume primitif, et la force transversale a augmenté de 50 pour 100.

La tige de ces chevillettes est un tronc de cône dont le diamètre à son extrémité est de $0^m,001$ plus grand que près de la tête; par là, il n'y a pas tendance à ce qu'elle sorte de la traverse. La tête est aussi un tronc de cône qui se loge dans le trou du coussinet, et dont le petit diamètre est égal au plus petit de la tige.

Les chevilles en bois paraissent avoir en Angleterre de nombreux partisans. En France, on a fait usage des chevillettes comprimées en bois pour les chemins de Tours à Nantes et de Gray à Blesmes; sur le chemin de Montereau à Troyes, on a employé des chevillettes non comprimées, mais elles se sont souvent pourries à la jonction du coussinet et de la traverse.

428. *Coins*. Ils doivent être d'un modèle bien choisi; le bois doit être sec, de droit fil, compacte et, autant que possible, exempt de nœuds ou autres défauts. Le bois ne doit pas être débité à la scie; il doit être fendu, et comme alors il n'a pas des formes assez régulières pour être passé au rabot, on obtient une bonne préparation en forçant le coin à coups de marteau dans une matrice en fer, dont le bord tranchant lui donne une forme qui approche de celle qu'il doit avoir définitivement.

On emploie généralement en Angleterre des machines pour la fabrication des coins. Avec de bonnes machines, on fabrique quatre coins par minute. La façon seule se paye 50 fr. par 1000 coins. Une machine de ce genre coûte 1750 à 1875 fr.

La fourniture de 75000 coins, pour le chemin de Rennes, a été adjugée à M. Corpazen, de Chelles, au prix de 140 fr. le mille.

Les coins ont environ $0^m,25$ de longueur. Leurs faces latérales doivent le mieux possible avoir les formes exigées par la joue du coussinet et la face latérale du rail. Le tableau page 549 donne les dimensions de leur section transversale moyenne sur quelques chemins.

*Extrait du cahier des charges, chemin de Strasbourg.* Les coins auront $0^m,26$ de longueur, $0^m,06$ de hauteur et environ $0^m,05$ d'épaisseur. Leurs faces supérieures et inférieures seront planes et parallèles; leurs faces latérales seront courbes et auront exactement le profil indiqué par le dessin approuvé par la compagnie, qui sera remis au fournisseur, revêtu de la signature de l'ingénieur en chef du matériel.

Les dimensions de la petite base du coin seront telles qu'il entrera, à la main, de 2 centimètres dans le gabarit poinçonné par la compagnie, qui sera remis au fournisseur; l'extrémité du coin ainsi présenté devra remplir exactement l'orifice du gabarit.

L'épaisseur de la grande base du coin sera de 8 millimètres plus forte que celle de la petite base.

Les coins seront en bois essence de chêne, ou d'acacia, compacte et bien sec. Ils seront sains, exempts de tous nœuds, roulures, gerçures, piqûres, etc., sans aubier ni bois blanc ; ceux qui présenteraient des flaches ou auraient été entaillés seraient rejetés.

Les coins seront taillés ou refendus de fil, dans le cœur du bois, et non débités à la scie. La dernière forme, celle exacte du dessin et modèle poinçonné, sera donnée au rabot.

Les coins qui seraient rebutés à la réception, ou pendant la pose, devraient être immédiatement remplacés par le fournisseur ou à ses frais.

429. *Rails.* La longueur des rails en fonte n'a jamais dépassé $1^m,20$ ; celle des rails en fer est le plus souvent de $4^m,50$ ; pour le chemin de fer de Paris à Rouen, on l'a portée à $4^m,80$, et à $5^m,50$ pour celui de Vierzon. La compagnie des chemins de fer du Midi a adopté la longueur de 5 mètres pour le rail Barlow et 6 mètres pour celui Brunel.

A longueur égale, les rails en fer coûtent moins que ceux en fonte; cela tient à ce que le fer employé à leur fabrication est de deuxième qualité, au lieu que la fonte doit être de première qualité. De plus, les rails en fer résistent mieux aux chocs et aussi bien aux causes de destruction atmosphériques que ceux en fonte, lesquels, une fois la croûte dure qui les recouvre usée, sont promptement détruits.

Fig. 74.




La section des rails en fer est ordinairement celle de deux champignons placés aux extrémités d'une même tige. Quelquefois, comme l'indique la figure 74, qui donne le tracé de la coupe du rail de Paris à Strasbourg, les deux champignons sont tout à fait semblables, de sorte que, quand l'un est usé, on peut retourner le rail ; mais alors le champignon usé coïncide mal avec le coussinet, et il devient difficile de rendre la voie bien unie et bien solide. Malgré cet inconvénient, sur le chemin de Saint-Étienne on a retiré de grands avantages de pouvoir retourner les rails (430). Quelquefois le champignon inférieur est remplacé par un simple bourrelet; enfin, on a fait des rails sans champignon inférieur ni bourrelet (Consulter le tableau page 558).

Les anciens rails étaient à champignons bombés ; puis on les a abandonnés pour faire leur face supérieure plane, plus ou moins arrondie sur les bords; et pour les chemins construits depuis environ 14 ans, on a donné la préférence à la première forme de champignons.

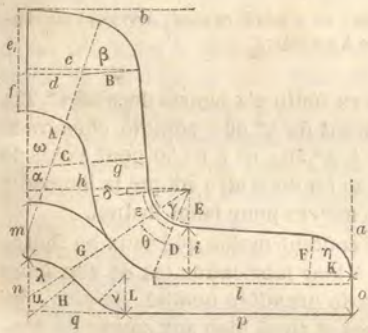
Au chemin de fer d'Auteuil, on vient d'employer partout le rail Brunel, fig. 75, excepté aux changements et croisements de voies, où l'on a mis le rail à double champignon et les aiguilles ordinaires.

La compagnie des chemins de fer du Midi a adopté le rail Brunel pour

la ligne de Bordeaux à Bayonne, parce que ce rail repose sur longrine, et que le sapin des Landes ne coûte que 55 fr. le stère; on l'emploie aussi pour les voies de garage, les remises et les gares.

La fig. 75 représente la moitié de la coupe du rail Brunel et de sa selle à l'échelle de 1/2.

Fig. 75.




| | Du rail. | De la selle. |
|---|---|---|
| Section. . . . | 0m,003856 | 0m,001923 |
| Poids par mètre courant. | 30k,00 | 15k,00 |
| Longueur. . . | 6m,00 | 0m,40 |
| Poids. . . . . | 180k,00 | 6k,00 |

Dimensions en millimètres : $a=74$, $b=83.5$, $c=29$, $d=14$, $e=17.25$, $f=9.75$, $e+f=27$, $g=15$, $h=31$, $i=13$, $k=40.75$, $l=52$, $m=15$, $n=14.25$, $m+n=29.25$, $o=10$, $p=58.25$, $q=25$.

Rayons des raccordements en millimètres : A=60, B=15, C=15.50, D=25, E=10, F=11, G=25, H=15, L=10.

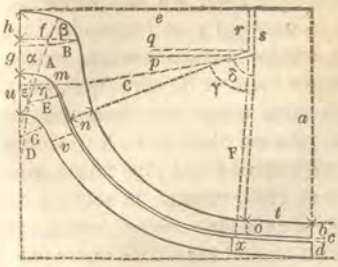
Angles des raccordements : $\alpha=18°15'$, $\beta=68°$, $\gamma=82°30'$, $\delta=3°50'$, $\varepsilon=63°40'$, $\eta=86°$, $\theta=31°15'$, $\lambda=55°$, $\mu=43°$, $\nu=43°$.

Les files de rails sont réunies, de 3 en 3 mètres, aux joints des longrines et à ceux des rails, par des traverses en bois ; les joints des rails se trouvent aux milieux des pièces formant les longrines; ces pièces ont 6 mètres de longueur comme les rails.

Chaque extrémité de rail est fixée à la selle par 4 rivets de 18 millim. de diamètre et de 50 millim. de longueur de tige avant la rivure, et un boulon de 15 millim. de diamètre de tige, placé alternativement à droite et à gauche du rail, près des selles et tous les 0m,50 de longueur de rail, relie le rail sur la longrine.

Pour la grande ligne du Midi, on ne devait employer que le rail Barlow, lequel ne contenant aucune partie en bois, promet une grande durée; mais la difficulté de se procurer de bons rails de ce système fait qu'on n'en a fait usage que de Bordeaux à Toulouse. La fig. 76 représente la moitié de la coupe de ce rail et de sa selle à l'échelle de 1/4.

Fig. 76.




| | Du rail. | De la selle. |
|---|---|---|
| Section. . . . . | 0m,005784 | 0m,004080 |
| Poids par mètre courant. . . . | 45k,00 | 31k,742 |
| Longueur. . . . | 5m,00 | 0m,60 |
| Poids. . . . . | 225k,00 | 19k,043 |

Dimensions en millimètres : $a=115$, $b=10$, $a+b=125$, $c=1.5$, $d=9$, $e=150$, $f=29$, $g=17$, $h=15$, $h+g=32$, $l=14$, $m=33$, $n=13$, $o=10$, $p=120.25$, $q=118$, $r=22.75$, $s=24.25$, la partie droite $t=36.25$ pour le rail, 38.75 pour le dessous, 39.25 pour le dessus de la selle, et 41 pour le dessous : toutes ces parties droites sont inclinées au 1/15; $u=22$, $v=11$, $x=d=9$.

Rayons des raccordements en millimètres : A = 60, B = 15.25, C = 88.25, D = 50, E = 15, F = 100. Pour la selle, on a : A = 50, B = 13, C = 101.25, F = 111.50, G = 12, les arrondis des extrémités des lèvres ont 2 millim. de rayon.

Angles des raccordements : $\alpha=18°20'$, $\beta=62°$, $\gamma=65°$, $\delta=76°20'$, $\varepsilon=7°$, $\eta=61°40'$. Pour la selle, on a : $\alpha=7°30'$, $\beta=63°45'$, $\gamma=58°$, $\delta=67°$, l'angle unique de G avec la verticale est de 61°55'.

Le rail Barlow repose directement sur le ballast; mais on dame bien le sable sous le rail, qu'on incline au 1/20 vers l'axe de la voie. Les selles ne sont placées qu'aux joints des rails, 12 rivets, dont la tige a 23 millim. de diamètre, et 60 millim. de longueur avant la rivure, fixent les extrémités des deux rails sur la selle, en amenant les lèvres en contact, tout en assurant la superposition du haut du rail sur la selle. Une entretoise en fer placée à côté de la selle et fixée au rail par deux rivets relie les deux files de rail. Ces entretoises sont des cornières de 13 millim. d'épaisseur moyenne, et de 100 millim. dans un sens et 65 millim. dans l'autre; leur longueur est 1m,85, leur section 0mq,002, et leur poids 29k,202 (page 562).

Des expériences ont été faites à l'usine de Decazeville dans le but de comparer les résistances des rails à double et à simple champignon. Les résultats se sont accordés avec la théorie pour donner, à poids égaux, l'avantage aux rails à double champignon, contrairement à l'opinion de M. Barlow. Cependant le nombre des partisans des rails à simple champignon, ou plutôt à double champignon, mais dont l'un est petit et ne sert qu'à fixer le rail, augmente chaque jour. Des modèles de cette espèce ont été adoptés nouvellement pour les lignes importantes, entre autres les cinq dernières du tableau page 558.

Si l'on considérait un rail comme un solide encastré par ses deux extrémités, ce qui aurait lieu si les coussinets étaient parfaitement fixes et maintenaient bien horizontales les parties encastrées, on pourrait calculer ses dimensions à l'aide de la formule $\frac{RI}{n}=\frac{PL}{8}$ du n° 229, dans laquelle on remplacerait I et $n$ par les valeurs qui conviennent à la

section du rail, pages 272 et suivantes. On peut, jusqu'à un certain point, considérer le rail comme étant encastré pour les parties qui ne correspondent pas à un joint ; mais les parties qui y correspondent ne peuvent être considérées que comme un solide encastré par une extrémité et reposant librement sur un appui par l'autre ; de sorte que, pour déterminer ses dimensions, il faudrait faire usage des formules du n° 228, dans lesquelles I et $n$ auraient, comme ci-dessus, les valeurs qui conviennent à la section du rail. La résistance étant plus faible dans ce dernier cas que dans le premier (228 et 229), comme la section du rail est partout uniforme, quelques ingénieurs ont moins écarté les coussinets des joints de leurs voisins que ne le sont les autres entre eux. (Observations du tableau page 558.)

Non-seulement il faut que les rails ne se rompent pas sous les charges qu'ils supportent, mais aussi que leurs vibrations ne soient pas trop fortes. On conçoit qu'il est impossible de tenir compte analytiquement de toutes les circonstances dans lesquelles se trouvent les rails pour résister, circonstances qui sont encore compliquées par le mouvement de la charge, et qu'il n'y a que la pratique qui pourra conduire aux formes et aux dimensions les plus convenables à donner aux rails.

D'après les expériences faites, il y a quelques années, par le docteur Barlow, à l'aide d'un déflectomètre de son invention, avec des blocs ou des traverses fermes, des coussinets bien fixés et des joints bien faits, la route elle-même étant solide, le rail est seulement fléchi, à la plus grande vitesse, d'une quantité très-peu supérieure à celle due à une charge en repos égale à la moitié du poids sur les deux roues, mais que, par suite de l'imperfection de ces parties, l'effort peut quelquefois produire une flèche environ double de celle due à la charge en question. Il s'ensuit que, jusqu'à ce qu'une plus grande perfection puisse être obtenue dans les rail-ways, on doit adopter une force de barre plus que double de celle nécessaire pour supporter les machines en repos. M. Barlow estime qu'une augmentation de 10 à 20 pour 100 au-dessus du double est suffisante, c'est-à-dire que pour une petite machine à 6 roues de 12 tonnes, comme le poids est distribué, un rail résistant à 7 tonnes serait grandement suffisant, et qu'avec un plus grand soin de construction, tel qu'on doit l'attendre maintenant, on pourrait, pour cette même force de rail, employer avec toute sécurité des machines de 14 à 16 tonnes.

*TABLEAU des expériences faites à l'usine de Decazeville sur la résistance des rails du chemin de fer de Paris à Orléans.* Le poids du mètre courant de rail était de 29k.21. Le rail reposait sur deux appuis de 0m.05 de largeur, écartés de 1m,25 d'axe en axe; la charge était appliquée au milieu, sur une largeur de 0m,07 (Extrait de la Métallurgie de MM. Flachat, Petiet et Barrault.)

| CHARGE en tonnes. | RAILS avec riblons et fin-métal. | | RAILS en fin-métal pur. | | RAILS avec fonte au bois et fin-métal. | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Flèche. | Flèche conservée, la charge étant enlevée. | Flèche. | Flèche conservée, la charge étant enlevée. | Flèche. | Flèche conservée, la charge étant enlevée. |
| | m. | m. | m. | m. | m. | m. |
| 8 | 0.0015 | 0.0000 | 0.0010 | 0.0000 | 0.0010 | 0.0000 |
| 9 | 0.0020 | 0.0000 | 0.0015 | 0.0000 | 0.0015 | 0.0000 |
| 10 | 0.0025 | 0.0000 | 0.0020 | 0.0000 | 0.0025 | 0.0000 |
| 11 | 0.0035 | 0.0000 | 0 0040 | 0.0000 | 0.0045 | 0.0000 |
| 12 | 0.0050 | 0.0000 | 0.0055 | 0.0000 | 0.0060 | 0.0000 |
| 13 | 0.0065 | 0.0010 | 0.0070 | 0.0015 | 0 0080 | 0.0020 |
| 14 | 0.0085 | 0.0020 | 0.0090 | 0.0030 | 0.0105 | 0.0035 |

Les expériences de ce tableau ont été faites avec un appareil qui permettait de laisser agir la charge autant de temps qu'on le désirait, et de l'enlever ensuite pour reconnaître jusqu'à quelle limite le rail, après avoir fléchi, pouvait revenir sur lui-même par son élasticité. Cette limite est entre 14 et 15 tonnes; au delà, le rail fléchit sans revenir aucunement sur lui-même. Les nombres du tableau sont des moyennes d'expériences faites sur des rails du chemin de fer de Paris à Orléans, dont les couvertures (assises supérieure et inférieure des trousses, 431) étaient faites, les premières avec un mélange de fin-métal et de riblons, les secondes avec du fin-métal pur, les troisièmes avec un mélange de fin-métal et de fonte au bois, celle-ci remplaçant les riblons (432).

*TABLEAU des poids, par mètre courant, et des dimensions principales de la section transversale des rails employés sur quelques chemins de fer.*

| DÉSIGNATION DES CHEMINS. | POIDS des rails par mètre courant. | ÉCARTEMENT des points d'appui. | POIDS du coussinet ordinaire *n*. | LARGEUR du champignon. | | LARGEUR au bourrelet. | LARGEUR de la tige. | HAUTEUR totale. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | supér. | infér. | | | |
| | k. | m. | k. | m. | m. | m. | m. | m. |
| Saint-Ét. à Lyon. . . 1er rail. | 13.00 | 0.90 | 3.00 | 0.043 | » | 0.020*b* | 0.014 | 0.083 |
| *Id.* nouveau rail. | 30.00 | *k* | 7.00 | 0.054 | 0.054 | » | 0.0175 | 0.115 |
| Montpellier à Cette. . . . . | 20.00 | 0.90 | » | 0.052 | » | 0.023*b* | 0.015 | 0.100 |
| Paris à Saint-Germain. . . . | 30.00 | 1.12 | 9.85 | 0.060 | 0.060 | » | 0.015 | 0.114 |
| Paris à Versailles (rive g.). . | 30.00 | 1.12 | 9.60 | 0.062 | » | 0.038 | 0.020 | 0.115 |
| Alais à Beaucaire. . . . . | 31.00 | 1.12 | 10.00 | 0.064 | 0.064 | » | 0.015 | 0.115 |
| Paris à Orléans. . . . . | 30.00 | *k'* | 9.20 | 0.053 | 0.054 | » | 0.016 | 0.111 |
| Paris à Strasbourg. . . . . | 37.50 | 1.12 | » | 0.060 | 0.060 | » | 0.0125 | 0.130 |
| Strasbourg à Bâle. . . . . | 25.00 | 0.90 | 8.50 | 0.060 | 0.060 | » | 0.016 | 0.095 |
| Paris à Rouen. . . . . | 36.00 | *k''* | 9.50 | 0.064 | 0.064 | » | 0.019 | 0.128 |
| Londres à Southampton. . . | 37.12 | 1.20 | » | 0.067 | 0.069 | » | 0.021 | 0.126 |
| *Id.* . . . . . | 33.00 | 1.20 | » | 0.064 | 0.058 | » | 0.019 | 0.124 |
| Grand Junction. . . . . | 31.00 | 1.12 | » | 0.067 | 0.058 | » | 0.018 | 0.113 |
| *Id.* . . . . . | 31.00 | 1.12 | » | 0.071 | 0.062 | » | 0.016 | 0.112 |
| Londres à Birmingham. . . . | 31.00 | 1.12 | » | 0.062 | 0.062 | » | 0.017 | 0.114 |
| *Id.* . . . . . | 37.00 | 1.20 | 11.70 | 0.065 | 0.070 | » | 0.021 | 0.126 |
| Liverpool à Manchester. . . | 37.12 | 1.20 | 10.00 | 0.076 | 0.061 | » | 0.017 | 0.128 |
| *Id.* . . . . . | 29.70 | 0.90 | » | 0.078 | 0.067 | » | 0.018 | 0.100 |
| Stockton à Darlington, nouveau rail. . . . . | 36.00 | 1.10 | » | 0.062 | 0.062 | » | 0.0175 | 0.126 |
| *Id.* . . . . . | 31.00 | 1.12 | » | 0.064 | » | 0.037*g* | 0.022 | 0.124 |
| York et North-Middland. . . | 27.00 | 0.90 | » | 0.062 | » | 0.029*b* | 0.020 | 0.113 |
| Brandling Junction. . . . . | 22.00 | 0.90 | » | 0.053 | » | 0.028*c* | 0.017 | 0.096 |
| Chester et Birkenhead. . . . | 27.72 | 0.90 | 9.45 | 0.064 | » | *d* | 0.021 | 0.124 |
| *Id.* . . . . . | 27.72 | 0.90 | 9.45 | 0.063 | » | *e* | 0.021 | 0.124 |
| Newcastle à Carlisle. . . . . | 24.75 | 0.90 | 7.20 | 0.065 | » | 0.025 | 0.016 | 0.110 |
| Clarence. . . . . | 24.78 | 0.90 | » | 0.055 | » | 0.030*c* | 0.014 | 0.101 |
| Eastern à Counties. . . . . | 37.12 | 1.20 | » | 0.062 | » | *f* | 0.032 | 0.109 |
| Londres à Greenwich. . . . . | 25.00 | 0.90 | » | 0.054 | » | 0.028*b* | 0.022 | 0.108 |
| Du Centre. . . . . | 36.00 | » | » | 0.060 | 0.060 | » | 0.018 | 0.130 |
| Du Nord. . . . . | 30.20 | » | » | 0.060 | 0.060 | » | 0.015 | 0.115 |
| De Bordeaux. . . . . | 34.00 | » | » | 0.060 | 0.060 | » | 0.016 | 0.130 |
| Avignon à Marseille. . . . . | 33.20 | » | » | 0.064 | 0.060 | » | 0.016 | 0.119 |
| Rail belge. . . . . | 34.00 | » | » | 0.065 | 0.050 | » | 0.019 | 0.126 |
| Great North of England. . . | » | » | » | 0.066 | 0.042 | » | 0.018 | 0.125 |
| York à Scarborough. . . . . | 32.33 | » | » | 0.067 | 0.054 | » | 0.021 | 0.130 |
| Londres à Birmingham. . . | 40.00 | » | » | 0.066 | 0.047 | » | 0.026 | 0.128 |

*n* le poids des coussinets de joint est de 2k,5 à 4k,00 plus élevé.

*b* bourrelets ne faisant saillie que sur une seule face de la tige : les autres sont symétriques par rapport à la tige ;

*c* bourrelets circulaires ayant pour diamètres les largeurs indiquées au tableau ; ils sont placés symétriquement par rapport à la tige ;

*d* tige unie ;

*e* tige unie, portant seulement d'un côté, vers le milieu de sa hauteur, une encoche triangulaire de 0m,004 de profondeur ;

*f* tige unie portant de chaque côté une encoche en arc de cercle, de 0m,02 de hauteur sur 0m,003 de profondeur ;

*g* il n'y a pas de bourrelet proprement dit, la tige est formée par deux courbes qui vont en s'éloignant, et dont la distance au bas est 0m,037, et la distance moyenne 0m,022 ;

*k* 0m,80 aux joints et 0m,90 ailleur ;

*k'* dans les tranchées dont le sol est très-bon, cet écartement est de 1m,00 aux joints et de 1m,25 ailleurs ; sur les remblais et dans les tranchées dont le sol est douteux, il est de 0m,75 aux joints et de 1m,00 ailleurs ;

*k''* 1m,12 aux joints et 1m,28 ailleurs.

*Relations qui existent, sur les lignes les plus importantes, entre le poids des rails, le poids et l'écartement des coussinets.*

| POIDS du mètre courant de rail. | ÉCARTEMENT des appuis. | POIDS des coussinets ordinaires. | POIDS des coussinets de joint. |
|---|---|---|---|
| 13 à 20 kil. | 0m,90 | 7 à 8,5 kil. | 9 à 11 kil. |
| 25 à 32 | 0m,90 à 1m,12 | 7 à 10 | 9 à 14 |
| 32 à 37 et au-dessus. | 1m,20 | 9,5 à 12 | 12 à 16 |

Des rails pesant moins de 20 kilog., avec un écartement de 0m,90 entre les appuis, sont trop légers pour le service des locomotives pesant de 8 à 16 tonnes, les plus légères étant montées sur 4 roues et les plus lourdes sur 6; il convient de porter ce poids à 25 kilog. pour un écartement d'appuis de 0m,90, quand on fait habituellement usage des machines de 16 tonnes; c'est le poids des rails du chemin de fer de Strasbourg à Bâle, où les coussinets ordinaires pèsent 8,50, ce qui est convenable. Pour les rails du poids de 30 kilog., tels que ceux du chemin de fer de Versailles (rive gauche) et d'Orléans, l'écartement 1m,12 entre les appuis est convenable, et il convient d'adopter 9k,20 pour les coussinets. Enfin, pour les rails de 36 à 37 kilog., tels que ceux du chemin de Paris à Rouen, l'écartement de 1m,20 entre les appuis, et le poids de 9,50 à 10 kilog. pour les coussinets paraissent satisfaisants. Cependant, les rails des chemins construits dans ces dernières années pèsent de 37 à 42 kilog. et leur longueur varie de 4m,50 à 6m,00.

L'emploi de lourdes machines sur les chemins anglais devenant général et se propageant en France, soit dans le but de marcher à de grandes vitesses, soit dans celui de traîner des charges considérables, on se sert de rails très-lourds. Ainsi, les machines pour le transport des voyageurs pesant environ 19 tonnes, non compris l'eau et le charbon que porte la chaudière, et celles destinées au transport des marchandises 22 tonnes, le poids des rails est généralement de 37 à 38 kilog. par mètre courant; ils ont 4m,50 de longueur et reposent sur 4 traverses espacées de 1m,125.

Avec ces proportions, la voie ayant 1m,44 de largeur, les convois de voyageurs marchent avec une vitesse moyenne de 16 lieues à l'heure, arrêts compris. Sur les chemins à voies larges, où les machines sont un peu plus puissantes, la vitesse moyenne est de 18 lieues.

On emploie sur quelques chemins de très-puissantes machines pesant jusqu'à 26 tonnes et plus. Elles sont utiles pour gravir de fortes pentes; mais elles ne seraient pas avantageuses pour traîner en plaine de très-fortes charges. L'expérience a prouvé qu'il ne convenait pas de com-

poser un convoi de marchandises de plus de 40 wagons. Les convois trop longs éprouvent une très-grande résistance dans les courbes et sont difficiles à manœuvrer dans les gares.

Aujourd'hui, on commence à faire usage de la machine-tender à 10 roues, système Engerth, qui pèse 50 tonnes vides et 64 en charge, et qui remorque 500 tonnes de poids utile. Comme il y a 8 roues qui sont motrices et que l'énorme poids de 64 tonnes se reporte sur 5 essieux, il en résulte que cette machine ne fatigue pas sensiblement plus la voie que les machines ordinaires.

**430.** *Usure des rails.* D'après des observations faites par M. Huish, sur le chemin de fer de Liverpool à Manchester, pour une circulation moyenne de 50 trains par jour, ou 18250 par an, les rails ne durent que 20 ans. M. Belpaire a trouvé que, sur les chemins belges, pour 3000 trains par an, les rails durent 120 ans; ce qui donne, en supposant la durée proportionnelle au nombre de trains, 20 ans pour 18000 trains, comme sur les chemins anglais. Il y a cependant lieu de remarquer que les rails belges ne pèsent que 25 kilog., au lieu que les rails anglais pèsent de 30 à 40 kilog.

M. Locard rapporte (*Recherches sur les rails et leurs supports*) qu'au chemin de fer de Saint-Étienne, sur 1290 rails de $0^m,12$ de hauteur, à double champignon de $0^m,053$ de largeur, et pesant 30 kilog. le mètre, après 5 ans et 10 mois de service, 47,36 pour 100 étaient intacts, 35,35 n'avaient pas été retournés, mais étaient attaqués en diverses parties; 16,04 avaient été retournés et se trouvaient fortement attaqués sur les deux faces, enfin 1,25 pour 100 étaient hors de service.

La hauteur des rails avait été réduite de $0^m,12$ à $0^m,118$, ce qui porte leur usure annuelle à $0^m,000343$.

**431.** *Fabrication des rails.* (Extrait de la *Métallurgie* de MM. Flachat, Petiet et Barrault). On emploie à la fabrication des rails tous les fers, pourvu qu'ils soient durs et rigides. Ces qualités sont réunies dans la plupart des fers qui proviennent du puddlage des fontes au coke; du reste, ces fers sont les seuls qui prennent cette destination; ceux au bois sont trop chers (433), et on les réserve pour la fabrication des machines, usage auquel les fers au coke sont impropres.

Les fours employés pour la fabrication des rails sont un peu plus grands que les fours à réchauffer ordinaires; ils doivent contenir 600 à 700 kilog. de fer en 3 ou 5 paquets, suivant le poids des rails que l'on fabrique. Chaque four fait ordinairement, en 24 heures, 16 chaudes qui produisent de 6 à 8 tonnes de fer fini. Il faut avoir 5 ou 6 fours en feu pour employer convenablement un train de laminoirs conduit par une bonne machine.

En France, on n'emploie que les laminoirs à la fabrication des rails; en Angleterre, dans quelques usines, on soude les paquets au marteau, avant de les passer aux laminoirs; ainsi, au sortir du four, le fer est

d'abord porté sous un marteau frontal de 3 à 4 tonnes, qui frappe de 15 à 20 coups; le fer est remis au feu pendant quelques minutes, puis seulement envoyé aux laminoirs. Cette méthode est excellente et doit diminuer les rails de rebut.

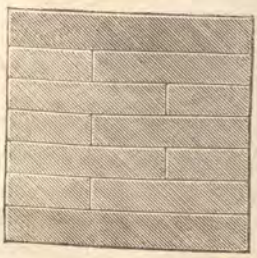
Les rails les plus forts pourraient se faire dans un train de cylindres marchands de $0^m,35$ de diamètre et de $1^m,00$ de table; mais on préfère des cylindres de $0^m,45$ à $0^m,50$ de diamètre, portant de $1^m,20$ à $1^m,40$ de table, et faisant de 55 à 65 révolutions par minute. Un train de cette espèce doit être desservi par une machine de 60 à 80 chevaux.

La confection d'un rail s'effectue généralement dans deux cages, dont la première comprend les cylindres ébaucheurs, et la deuxième les cylindres finisseurs; les ébaucheurs ont au moins 5 cannelures, et les finisseurs en portent 6, dont la forme se rapproche graduellement de celle à donner au rail.

Les rails s'affranchissent à chaud au moyen de scies circulaires. Ces scies ont de $0^m,80$ à $1^m,20$ de diamètre et $0^m,004$ d'épaisseur; elles sont maintenues entre deux plateaux en fonte qui les empêchent de se voiler, et elles trempent dans une bâche remplie d'eau qui évite qu'elles se détrempent trop vite; elles font de 800 à 1000 tours à la minute et coupent un rail en 12 ou 15 secondes. On doit les changer et les visiter toutes les douze heures, et il en faut 3 ou 4 de rechange. Leur usure est de $0^m,004$ à $0^m,005$ par jour.

En France, on coupe une extrémité pendant que le rail est chaud; on laisse refroidir, puis on réchauffe l'autre extrémité pour l'affranchir. En Angleterre, on affranchit les deux extrémités à la fois, à l'aide de deux scies placées à une distance convenable, pendant que le rail est chaud; mais on est moins sûr de l'uniformité de longueur des rails refroidis.

Fig. 77.



Les trousses destinées à la fabrication des rails sont généralement composées, comme l'indique la figure 77, de sept assises de barres de fer. La première assise est une seule barre de fer qui a subi un premier corroyage, fer n° 2, destinée à former le champignon supérieur; les cinq assises suivantes sont en fer puddlé brut, fer n° 1, et composées chacune de deux barres de fer ayant, pour les plus grandes trousses, l'une $0^m,108$ de largeur, et l'autre $0^m,054$; ces assises sont superposées de manière à faire croiser les joints; enfin, l'assise inférieure est en fer n° 2, et composée, comme l'assise supérieure, d'une seule barre, si le rail est à double champignon.

La plus grande dimension que l'on donne aux paquets est de $0^m,162$ de largeur sur une épaisseur à peu près égale.

En moyenne, pour 1000 kilog. de rails reçus, on a 100 kilog. de rails rebuts, 100 kilog. de déchet au four et 125 kilog. de bouts coupés, ce qui fait un total de 1325 kilog. de fer à mettre au four; d'où il s'ensuit que, pour obtenir un rail de $4^m,50$ de longueur et pesant 30 kilog. le mètre courant, le paquet doit contenir 135 kilog. pour le rail, 17 kilog. pour les bouts coupés et 13 kilog. pour le déchet au four, ce qui fait un total de 165 kilog.

Le rapport que l'on admet entre le poids du fer n° 2 employé et celui du fer brut varie de $\frac{2}{7} = \frac{6}{21}$ à $\frac{1}{3} = \frac{7}{21}$; ainsi le paquet précédent de 165 kilog. serait composé de 55 à 48 kilog. de fer n° 2 et de 110 à 117 kilog. de fer n° 1. La longueur du paquet serait de 1 mètre environ. Pour un rail de 36 kilog., le paquet aurait environ $1^m,20$ de longueur.

*Composition des trousses pour fabriquer le rail Brunel*, fig. 75, *à l'usine de Decazeville.*

| ASSISES. | ÉPAISSEUR. | 1re BARRE. | | 2e BARRE. | | 3e BARRE. | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Nature du fer. | Largeur. | Nature du fer. | Largeur. | Nature du fer. | Largeur. |
| | mm. | | mm. | | mm. | | mm. |
| 1 | 27.0 | Ballé. | 189 | » | » | » | » |
| 2 | 22.5 | *id.* | 54 | Puddlé. | 81 | Ballé. | 54 |
| 3 | 22.5 | Fort. | 81 | Fort. | 108 | » | » |
| 4 | 22.5 | Puddlé. | 108 | Puddlé. | 81 | » | » |
| 5 | 22.5 | *id.* | 54 | *id.* | 81 | Puddlé. | 54 |
| 6 | 21.5 | Fort. | 81 | Fort. | 108 | » | » |
| 7 | 12.5 | *id.* | 108 | *id.* | 81 | » | » |

Le fer fort est du fer puddlé propre à la fabrication de la tôle. La trousse est ainsi composée de 49 kilog. de fer ballé, 98 kilog. de fer fort, et de 79 kilog. de fer puddlé : total, 226 kilog.

A l'usine d'Aubin, pour le même rail, la trousse est composée de 75 kilog. de fer ballé et de 145 kilog. de fer puddlé : total, 220 kilog., et elle est formée comme il suit :

| ASSISES. | ÉPAISSEUR. | 1re BARRE. | | 2e BARRE. | | 3e BARRE. | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Nature du fer. | Largeur. | Nature du fer. | Largeur. | Nature du fer. | Largeur. |
| | mm. | | mm. | | mm. | | mm. |
| 1 | 27 | Ballé. | 189 | » | » | » | » |
| 2 | 20 | *id.* | 54 | Puddlé. | 81 | Ballé. | 54 |
| 3 | 20 | Puddlé. | 81 | *id.* | 108 | » | » |
| 4 | 20 | *id.* | 108 | *id.* | 81 | » | » |
| 5 | 20 | *id.* | 81 | *id.* | 108 | » | » |
| 6 | 20 | *id.* | 108 | *id.* | 81 | » | » |
| 7 | 20 | *id.* | 81 | *id.* | 108 | » | » |
| 8 | 20 | *id* | 108 | *id.* | 81 | » | » |
| 9 | 15 | Ballé. | 189 | » | » | » | » |

432. *Réception des rails.* Les rails doivent être affranchis à la scie. Les 19/20 doivent être de même longueur, à 1 millimètre près, 2 millimètres au maximum, en plus ou en moins. 1/20 peut être reçu avec une longueur moindre, mais constante, et de 3m,375 ou de 4 mètres. Cette tolérance est accordée afin de diminuer les déchets; mais les rails ne doivent pas être fabriqués pour cette longueur. Les rails plus courts trouvent leur emploi dans les courbes et dans les raccordements de voies de garage.

On accorde une tolérance de 2 pour 100, en plus ou en moins, pour chaque rail, sans dépenser 1 pour 100 pour la totalité des rails. Les rails trop légers sont rebutés; ceux qui sont trop lourds sont payés à raison du poids normal augmenté de la tolérance.

On juge de la qualité du fer par la cassure. Toutefois, comme il serait coûteux de casser un certain nombre de rails, on les essaye de préférence en faisant supporter un poids déterminé à un certain nombre pris au hasard. Il y a quelques années, le cahier des charges pour la fourniture aux chemins de l'État stipulait que les rails à champignon, placés librement sur deux appuis de 0m,08 de largeur chacun et espacés entre eux de 1m,12 de milieu en milieu, devaient pouvoir supporter, dans le milieu de l'intervalle, une charge de 8000 kilog. sans éprouver de flexion apparente. Au chemin de Strasbourg, dans le cahier des charges, on a stipulé que les rails seraient en fer dur et résistant, et qu'ils pourraient être soumis à l'épreuve suivante : placés librement sur deux coussinets distants de 1m,125 d'axe en axe, ils devront supporter dans le milieu un poids de 10 000 kilog. sans flexion permanente.

Quelquefois, lorsqu'on a lieu de craindre que le fer ne soit cassant, on fait subir aux rails le choc d'un mouton ou on les laisse tomber d'une certaine hauteur sur des corps durs, de la même manière

qu'on essaye les essieux d'artillerie. L'administration des ponts et chaussées n'exige pas l'épreuve par le choc, qui cependant est souvent nécessaire.

On éprouve les essieux d'artillerie, en les faisant reposer sur une table en fonte par les extrémités de leurs corps, et en laissant tomber sur leur milieu, d'une hauteur de $1^m,60$ ou $1^m,00$, un mouton du poids de 300 kilog., ou encore en les faisant tomber d'une hauteur de $2^m,11$ sur deux demi-cylindres en fonte sur lesquels ils portent simultanément.

La réception des rails à l'usine se fait tous les huit jours, ou mieux tous les quinze jours, ce qui est plus convenable, surtout quand un même agent est chargé de la réception dans plusieurs usines.

Malgré les essais, le fabricant doit encore garantir ses rails pendant un an de service.

La compagnie du chemin de fer de Strasbourg a eu occasion de se féliciter d'avoir inséré, comme le conseillent MM. Perdonnet et Polonceau, dans le cahier des charges pour les rails et coussinets, un article stipulant que le fabricant ne pourra commencer la fabrication que lorsqu'il aura remis un premier échantillon de sa fabrication à l'ingénieur en chef de la compagnie, et que l'ingénieur en chef, satisfait de cet échantillon, lui aura envoyé par écrit l'autorisation de commencer.

Comme pour les coussinets (426), la compagnie a à l'usine un agent de son choix chargé de la surveillance de la fabrication des rails.

**433.** *Prix des rails.* Le prix des rails suit le prix des fers, et il est par conséquent très-variable d'un moment à l'autre. En 1828, les rails du chemin de Saint-Étienne ont coûté 50 fr. les 100 kilog.; dix ans plus tard, pour les chemins de Saint-Germain, de Versailles, etc., ils coûtaient 42 fr. rendus à Paris. En 1846, la compagnie de l'Est les a payés 35 fr. rendus sur ses chantiers; en 1852, elle les a payés 25 fr. pour le chemin de Metz à Thionville, et en 1854, 26 fr. pour le chemin de Mulhouse. D'autres compagnies ont traité au prix de 30 fr.

En France, le fer employé à la construction des machines coûte environ moitié en sus du prix de celui fabriqué en rails.

**434.** *Pose des rails.* Afin de permettre la dilatation des rails, on laisse entre leurs extrémités un jeu de 4 ou de 2 millimètres, selon que la pose a lieu en hiver ou en été.

La face supérieure du champignon doit être légèrement inclinée vers l'axe de la voie (*fig.* 72, p. 550). En taillant les traverses sous les patins des coussinets, on peut obtenir ce résultat.

Dans les courbes, on tient le rail extérieur un peu plus élevé que celui intérieur, afin de contre-balancer l'effet de la force centrifuge. Sur des chemins à grande vitesse, et pour des rayons de 1200 à 1500 mètres, cette différence de niveau se prend égale à $0^m,02$.

Sur les remblais, afin d'obvier au tassement inégal qui a lieu sur la

largeur de la voie, on pose le rail voisin de l'entre-voie un peu plus bas que celui du côté du talus ; le rail le plus bas se place au niveau général du chemin.

435. *Plaques tournantes.* Les plaques proprement dites, c'est-à-dire les plateaux sur lesquels sont posés les rails, peuvent être en fonte ou en bois. Ces dernières coûtent moins d'établissement ; mais elles fonctionnent moins bien et exigent plus d'entretien que les premières ; aussi, pour les grandes lignes surtout, convient-il d'adopter les plaques en fonte. Dans ces derniers temps, on a construit beaucoup de plaques tournantes en tôle.

Les plaques peuvent ne porter qu'une voie, ou en porter deux à angle droit. Des plaques placées aux extrémités des gares, où ne passent jamais les convois, peuvent être à une voie ; mais celles qui se trouvent sur les parties du chemin où les convois circulent doivent être à deux voies, afin de ne jamais interrompre la ligne.

Le diamètre des plaques varie ordinairement de 4 mètres à $4^m,50$ ; elles sont supportées par dix ou douze galets de $0^m,30$ à $0^m,40$ de diamètre, avec une largeur de jante de $0^m,07$ environ. Les galets peuvent être fixes et tourner sur leur axe, ou mobiles et rouler entre deux chemins de fer circulaires, fixés l'un à la plaque tournante, l'autre sur le fond de la fosse ; on adopte généralement cette dernière disposition, dans laquelle le frottement des axes des galets étant supprimé, ou à peu près, les plaques sont plus faciles à manœuvrer. Les galets mobiles sont maintenus à une distance constante du pivot de la plaque par leurs axes, qui se prolongent jusqu'à ce pivot ; deux cercles en fer, l'un à l'intérieur et l'autre à l'extérieur des galets, ou quelquefois un cercle extérieur seulement, relient les extrémités des axes et maintiennent l'écartement respectif des galets ; ces axes sont en fer de $0^m,025$ environ de diamètre. Pour que les plaques soient bien assises, il convient de placer les galets près de leur pourtour.

La partie de pivot prise dans la crapaudine a de $0^m,08$ à $0^m,10$ de diamètre. Il convient que la plaque porte la crapaudine, et que le pivot soit fixé à la plaque de fondation ; par là, on n'a pas à craindre que des particules solides viennent s'interposer entre les parties frottantes. Des boulons servent à régler la charge qui doit reposer sur le pivot ; la plaque se trouvant ainsi supportée en son milieu et à son pourtour, elle exige moins d'épaisseur que si elle reposait seulement sur les galets.

Les premières plaques du chemin de l'Est avaient 5 mètres de diamètre ; on donne 6 mètres aux nouvelles.

Il y a des plaques qui doivent porter à la fois la locomotive et son tender ; on leur donne $11^m,60$ de diamètre.

Une plaque en fonte de $3^m,40$, du chemin de l'Est, est revenue à 2381 fr., plus 127 fr. de pose ; une autre de $4^m,20$, à 4527 fr., plus 172 fr. de pose ; une autre de $6^m,00$, à 6011 fr., plus 401 fr. de pose ; et une autre de $11^m,00$, à 9715 fr., plus 600 fr.

pour un plancher en bois de $0^m,08$ d'épaisseur, et 400 fr. pour la pose. Ces prix ne comprennent pas les fondations qui ont coûté 4560 fr. pour la plaque de $11^m,00$.

Au chemin du Nord, une plaque en tôle et fonte de $4^m,20$ a coûté 5163 fr. sans pose.

Au chemin de l'Est, une plaque de $11^m,60$, système Buddicom, en fer, fonte et bois, a coûté 15600 fr.; le plancher, en bois de $0^m,08$, 650 fr.; la pose 450 fr., et les fondations 5500 fr.

**436.** *Plantation de haies de clôture* (Extrait du cahier des charges du chemin de Strasbourg). Les haies seront plantées sur des alignements fixés à l'avance à la distance de $0^m,50$ des limites de la propriété de l'État, et sur les autres points qui seront indiqués par les agents de la compagnie.

L'entrepreneur fera défoncer à la bêche le terrain destiné à recevoir les plants sur une largeur de $0^m,60$ à $0^m,80$, et à une profondeur qui variera, suivant la nature du sol, de $0^m.25$ à $0^m,50$. Les mottes seront brisées, et la terre sera ameublie et purgée de pierres et de racines.

La plantation s'effectuera du 1er octobre à la fin de mars. Les plants seront placés sur un seul rang, espacés de $0^m,10$ au plus, de manière qu'il en entre au moins dix par mètre courant.

Chaque brin offrira une racine chevelue; il sera coupé en bec de flûte à $0^m,10$ ou $0^m,15$ du collet de la racine; il aura de 12 à 15 millimètres de circonférence au pied.

Les planteurs apporteront le plus grand soin à recouvrir les racines de terre en les pressant convenablement et sans contrarier leur direction naturelle.

Les haies seront formées d'épines blanches provenant de semis; il sera interdit d'en prendre dans les bois.

On ne choisira que des sujets bien sains, en rejetant ceux dont les racines seraient cassées ou endommagées; ils ne devront pas être âgés de plus de trois ans.

La réception provisoire aura lieu immédiatement après l'achèvement complet des travaux. La réception définitive n'aura lieu que deux années après la plantation, et, à l'époque de la réception définitive, il devra exister par mètre courant au moins dix sujets bien vivants, en pleine vigueur, et répartis de telle sorte qu'il n'y ait pas entre deux plants voisins une distance supérieure à $0^m,15$.

L'entrepreneur demeurera chargé de l'entretien des haies jusqu'à leur réception définitive.

Il exécutera chaque année : un labour au mois de mars, un binage au mois de mai, un second binage au mois de juillet, et un troisième, s'il en est besoin, au mois de septembre.

Il remplacera en temps convenable les sujets morts. Il recèpera et rafraîchira ceux qui en auront besoin, dirigera les branches vigoureuses et coupera celles qui seront mortes.

Il fera écheniller aux mois de février, mars et mai; recherchera et brûlera attentivement les nids, tissus et bourses de chenilles.

Les haies seront payées au mètre courant. L'entrepreneur recevra un à-compte pour chaque longueur de 10 000 mètres de haies qu'il aura plantées. On fera une retenue de deux dixièmes sur le prix, lesquels seront restitués de la manière suivante :

Un dixième une année après la réception provisoire de la plantation tout entière, et le dernier dixième après la délivrance des certificats de réception définitive.

Aujourd'hui la dépense pour les haies vives est de 0f.80 environ par mètre courant, y compris l'entretien pendant dix ans.

**437.** *Fourniture et pose des clôtures en treillage.* (Extrait du cahier des charges du chemin de Strasbourg) Des clôtures en treillage seront établies sur la limite des terrains appartenant à l'État, et sur les autres points qui seront indiqués ultérieurement à l'entrepreneur par les agents de la compagnie.

Ces clôtures se composeront d'un treillage en bois, formé par des lattes verticales reliées entre elles par trois cordons de fil de fer, et fixées sur des cadres formés chacun par deux traverses horizontales et deux poteaux montants.

Les lattes verticales auront $1^m.30$ de longueur, 25 à 30 millimètres de largeur et de

9 à 11 millimètres d'épaisseur, et elles ne présenteront que des intervalles de 40 à 50 millimètres.

Ces lattes seront appointies à leur partie supérieure; elles devront être droites et non redressées. Lorsqu'elles seront posées, leur partie inférieure devra se trouver à 0m.05 du sol.

Chaque cordon de fil de fer se composera de deux fils n° 12, qui embrasseront les lattes et qui seront tordus de six à sept fois entre deux lattes consécutives.

La longueur des traverses horizontales sera au moins de 2m.60; elles auront 30 millimètres de largeur et 10 millimètres d'épaisseur.

La traverse supérieure sera placée, ainsi que la traverse inférieure, à 10 centim. du bout des lattes.

Ces traverses seront clouées contre les poteaux, de manière à former avec ceux-ci un cadre solide.

Les assemblages des traverses à leur jonction devront être fortement consolidés par des embrasses en fil de fer n° 10, ayant plusieurs tours.

Les poteaux montants seront espacés de 1m.30 d'axe en axe; ils auront 1m.80 de longueur totale et ils seront enfoncés de 0m,40 à 0m,50 dans le sol.

La section pourra être, au choix de l'entrepreneur, un cercle, un demi-cercle ou un quart de cercle, dont le diamètre devra être respectivement de 8, 9 et 12 centimètres.

Ces poteaux seront droits et enfoncés à la masse. Leurs têtes seront récépées et taillées en pointe après leur enfoncement, et la partie enfoncée en terre sera préalablement durcie au feu.

Le treillage déroulé sera fixé d'abord à chaque poteau montant au moyen de trois clous au moins; ensuite aux deux traverses horizontales au moyen de cinq attaches sur chaque traverse entre deux poteaux montants. Ces attaches seront en fil de fer n° 10. Le nœud en sera serré et aura plus d'un tour.

Les lattes, traverses et poteaux seront en bois de chêne, de châtaignier ou d'acacia, au choix de l'entrepreneur.

Les lattes et traverses seront prises dans le cœur du bois fendu et bien de fil.

Les bois pour poteaux seront sans écorce.

La réception provisoire aura lieu après l'achèvement complet des travaux, et la réception définitive après l'expiration d'une année de garantie, pendant laquelle l'entrepreneur devra pourvoir aux réparations et remplacements qui seraient suscités par la malfaçon ou la mauvaise qualité du bois; les travaux qui proviendraient de causes étrangères lui seraient payés.

Les clôtures seront payées au mètre courant. L'entrepreneur recevra un à-compte par chaque longueur de 10 000 mètres de clôture posée, avec retenue de deux dixièmes de garantie, qui seront payés : un dixième dans le mois qui suivra l'achèvement des travaux et la réception provisoire, et le dernier dixième immédiatement après la réception définitive, à l'expiration de l'année de garantie.

Pour le chemin de Paris à Mulhouse, les clôtures se composent de poteaux de 1m.40 de hauteur espacés de 1m.50, et réunis par 3 lisses seulement, ou par un treillage en échalas, selon que les localités sont peu ou très-habitées. Les premières ont coûté 0f.45 le mètre courant, en 1854, et les secondes 0f.75; soit le double par mètre courant de chemin.

438. *Chemins de fer à deux ou à une seule voie.* Pour une circulation de 500 000 tonnes de marchandises et 1 000 000 de voyageurs par an, on établit un chemin à deux voies; lorsque la circulation ne dépasse pas 200 000 tonnes de marchandises et 400 000 voyageurs, le chemin peut être à une seule voie, avec une longueur de voies d'évitement égale au cinquième ou au quart de la longueur totale du chemin.

Pour un chemin à une seule voie, on achète les terrains pour deux voies, qui peuvent devenir nécessaires par la suite. Les travaux d'art et les tranchées s'exécutent pour les deux voies; mais les remblais en empierrement ne s'établissent que pour une seule.

La grande ligne de Bordeaux à Cette sera à une seule voie, avec des gares d'évitement en nombre suffisant.

En Allemagne, la majeure partie des chemins de fer sont à une seule voie, quoique, sur quelques-uns, le transport soit à peu près celui qui a lieu sur certains parcours des chemins français de premier ordre. Ainsi, sur le chemin de Cologne à Minden, long de 272 kilom., le parcours kilométrique journalier est de 4000 kilom. Les trains express ont une vitesse de marche de 70 kilom. à l'heure, ou une vitesse moyenne de 50 kilom.

### WAGONS.

439. *Wagons de terrassement.* Ils sont portés sur quatre roues; les roues sont fixées aux essieux, qui tournent dans des boîtes entièrement e nfonte.

Ces wagons doivent être d'une construction simple et d'une solidité en rapport au temps pendant lequel ils doivent servir et au service auquel on les destine. Leur hauteur ne doit pas dépasser $1^m,60$, afin qu'un homme de moyenne taille puisse les charger facilement; elle était de $1^m,53$ au chemin de Versailles (rive gauche), et de $1^m,55$ au chemin de Saint-Germain. Le poids doit, autant que possible, être réparti uniformément sur les quatre roues.

La caisse est mobile autour d'un axe qui lui permet de verser par une extrémité du wagon ou sur le côté, et quelquefois à volonté sur le devant ou sur le côté. Elle charge d'environ 30 kilog. moins du côté qu'elle se renverse que de l'autre, afin qu'elle n'oscille pas d'une manière continue et ne se renverse qu'à la volonté des conducteurs. Leur angle de versement ne doit pas être de moins de 40 à 45°; il convient que les terres les plus adhérentes, les terres argileuses ou humides, se détachent sans trop de difficulté de la caisse renversée. La forme trapézoïdale que l'on donne horizontalement à la caisse et l'inclinaison de ses parois latérales facilitent encore le déchargement; il convient aussi que les terres tombent à une certaine distance de la caisse. Sur le chemin de Versailles (rive gauche), les caisses avaient $0^m,39$ de profondeur, $2^m,26$ de longueur en haut sur $2^m,06$ au fond, et $2^m,10$ de largeur en haut sur $1^m,90$ au fond.

Le fond de la caisse doit être très-épais; on le fait en sapin ou en peuplier; les parois latérales se font en chêne ou en sapin.

Toutes les ferrures doivent être bien proportionnées et en fer de bonne qualité.

Dans les anciens wagons, la caisse, en se renversant, tourne autour d'un axe situé à un niveau supérieur aux roues; dans les nouveaux, dits anglais, la caisse tourne sur un des essieux, ce qui a permis de faire les roues plus grandes. Dans les premiers, les fusées sont en dehors des roues, et dans les seconds, elles sont en dedans.

Les essieux sont en fer de première qualité, et leurs fusées seules sont tournées. Aux chemins de Versailles (rive gauche) et de Saint-Germain, le diamètre de l'essieu était de $0^m,085$ entre les roues, de $0^m,076$ aux points de calage des roues, et de $0^m,05$ aux fusées; la longueur de l'essieu, entre les deux fusées, était de $1^m,72$.

Les roues sont en fonte, d'une seule pièce; elles sont coulées en coquille, afin de tremper en quelque sorte le pourtour de la jante. Le moyeu porte des fentes qui le divisent en autant de secteurs qu'il y a de bras; par cette précaution, le retrait se fait facilement dans toutes les parties de la roue. Ces fentes se remplissent avec des cales en fer, après avoir cerclé le moyeu avec deux frettes en fer posées à chaud.

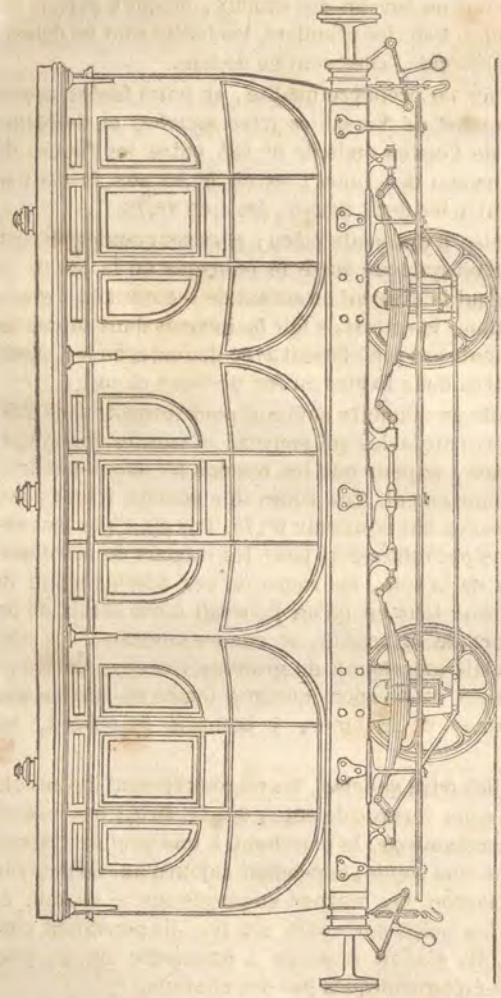
Les roues doivent avoir un diamètre suffisant pour franchir sans difficulté les pierres ou autres obstacles qui peuvent se trouver sur la voie pendant les terrassements, et pour que les wagons ne soient pas trop difficiles à mettre en mouvement. Les roues des anciens wagons ont $0^m,50$ de diamètre, et celles des nouveaux $0^m,75$. Pas plus que les premières, ces dernières ne peuvent servir pour les wagons de marchandises après l'exécution de la voie, les roues de ces wagons ayant de $0^m,90$ à $1^m,00$ de diamètre; tout ce qu'on pourrait faire serait de les utiliser pour le transport de la houille, et encore faudrait-il les cercler en fer, si l'on voulait marcher à de grandes vitesses; du reste, les roues sont entièrement usées après quelque temps de service aux terrassements. La largeur de la jante, y compris le rebord, est de $0^m,12$.

Au chemin de Versailles (rive gauche), les wagons versant devant ont coûté 640 fr. 65 c., et ceux versant de côté, 664 fr. 80 c.; ces wagons étant traînés par des locomotives, et marchant à une grande vitesse, ils étaient d'une construction solide; cependant aujourd'hui on pourrait les établir à meilleur marché. Les wagons employés sur le chemin de fer de Lille à la frontière belge ont coûté 450 fr.; ils pouvaient contenir $1^{mc},60$ de terre; ils étaient destinés à descendre sur un plan incliné de $0^m,015$, ou à être remorqués par des chevaux.

Les anciens wagons contenaient $1^{mc},50$ comptés au déblai; les wagons anglais petit modèle contiennent $1^{mc},50$ à $1^{mc},75$, et ceux du grand modèle $3^{mc},10$. Le nouveau modèle belge, pouvant à volonté verser devant ou de côté, cube $3^m,30$. La compagnie des chemins de l'Est vient de payer 700 fr. le wagon anglais grand modèle, et 900 fr. le wagon belge.

**440.** *Wagons de service et voitures pour les voyageurs.* Les boîtes à graisse sont en fonte, mais toujours munies de coussinets en bronze ou en métal blanc (442). La caisse est toujours montée sur ressorts ; elle est supportée par les extrémités de ces ressorts, dont le milieu repose sur la boîte à graisse. Celle-ci est prise entre les deux branches d'une plaque en fer ou en forte tôle, dite *plaque de garde*, qui est solidement fixée au châssis du wagon et maintient invariable l'écartement des essieux.

Fig. 78.



Les voitures, à part quelques exceptions concernant les wagons destinés au transport des marchandises, portent des ressorts qui amortissent les chocs et les secousses des différentes voitures d'un convoi les unes contre les autres ou contre les obstacles qu'elles peuvent heurter.

Quelques ingénieurs préfèrent, pour les convois à grande vitesse, les voitures à 6 roues. Le mouvement de lacet étant moins grand qu'avec les voitures à 4 roues, elles sont moins sujettes à dérailler, et la caisse, en cas de rupture d'un essieu, est soutenue par les deux autres.

En France, on a adopté des voitures à 6 roues pour les chemins de

Paris à Lyon et d'Avignon à Marseille. On a conservé celles à 4 roues pour les chemins du Nord et de Strasbourg (444).

En Angleterre, les voitures de voyageurs sont en général à 4 roues et à 3 compartiments. Sur les chemins où l'on a fait primitivement usage de voitures à 6 roues, on a supprimé l'essieu du milieu. On trouve les voitures à 4 roues plus stables et plus sûres, surtout depuis qu'on fabrique des essieux assez forts et d'assez bonne qualité pour qu'ils ne cassent plus.

On a encore établi des voitures à 8 roues, mais formant deux trains indépendants.

Sur le chemin de fer de South-Eastern, on a mis en service des voitures à 8 roues; l'expérience ne leur a pas été favorable.

Les voitures de première classe sont ordinairement à trois caisses contenant chacune 8 voyageurs; celles de deuxième classe, à trois caisses de chacune 10 voyageurs, et celles de troisième classe, à quatre compartiments de 10 voyageurs.

Sur les nouvelles lignes, entr'autres celle de Bordeaux à Cette, on a augmenté la longueur des caisses des voitures de deuxième et de troisième classe, de manière à augmenter le nombre des compartiments. Les anciens wagons de deuxième classe coûtent 5 600 fr., et les nouveaux, qui contiennent 40 voyageurs, 6 100 fr.; les anciens, de troisième classe, coûtent 5 225 fr., et les nouveaux, qui reçoivent 50 voyageurs, 6 000 fr.

La fig. 78 représente, à l'échelle de 1/50, l'élévation d'une voiture de première classe du chemin du Nord.

441. *Poids des voitures. Chargement.* Les voitures du chemin de fer du Nord sont d'un poids considérable. Le tableau suivant donne les poids, roues et essieux compris, des différentes voitures de ce chemin.

| | | kilog. |
|---|---|---|
| Voitures à voyageurs. . . | 1re classe. . . | 5240 |
| | 2e classe. . . | 5000 |
| | 2e à frein. . . | 5300 |
| | 3e classe. . . | 4760 |
| | 3e à frein. . . | 5113 |
| Trucks. . . . . | à équipages. . | 3620 |
| | à diligences. . | 1240 |

Le chargement le plus habituel d'un wagon à 4 roues ne dépassait pas anciennement 5 tonnes; mais depuis quatre ans, que l'on fabrique des essieux plus résistants, on a augmenté les chargements, que l'on peut porter à 4 ou 5 tonnes par essieu pour les voies à rails de fortes dimensions et tracées avec des courbes d'assez grand rayon. Au chemin du Nord, les nouveaux wagons à 4 roues, pour le transport de la houille, se chargent de 10 tonnes, non compris 3 1/2 à 4 tonnes de poids mort. Les fusées ont 0m,08 de diamètre et 0m,17 de longueur.

Les entreprises de messageries transportent les voyageurs dans les caisses de leurs voitures, seulement liées sur un train par des courroies. Ce mode de transport n'est pas sans danger en cas de choc ou de tout changement brusque de vitesse.

**442.** *Essieux, roues, boîtes à graisse et ressorts.* Les essieux doivent être exempts d'angles rentrants vifs; les parties de différents diamètres doivent être raccordées par des congés arrondis. Comme on a remarqué que l'altération des essieux brisés est moins sensible dans le voisinage des clavettes que dans les parties qui en sont éloignées, sur quelques chemins on cale les roues sur les essieux au moyen de trois clavettes, quoique une puisse suffire.

Les fusées des essieux sont presque toujours placées en dehors des roues, ce qui permet d'en réduire le diamètre et par suite la résistance due à leur frottement. Il est bon de les tenir un peu fortes, afin de pouvoir, au besoin, les remettre sur le tour. On a remarqué que les coussinets s'usaient moins rapidement lorsqu'on donnait une grande hauteur aux collets des fusées, et qu'on en rendait la face intérieure plane.

Au chemin de Lyon, les anciennes fusées avaient $0^m,065$ de diamètre et $0^m,127$ de longueur; les nouvelles ont $0^m,075$ de diamètre et $0^m,160$ de longueur. On a reconnu que sous la charge de 1540 kilog. pour les voitures à voyageurs et de 1900 kilog. pour les wagons à marchandises, ce qui correspond à 18 et 23 kilog. par centimètre carré de la projection $12,7 \times 6,5 = 82^{cq},55$ de la fusée, les fusées s'échauffaient un peu, mais sans cesser de donner une bonne marche.

Les essieux du chemin de fer de Strasbourg à Bâle sont fabriqués en corroyant sept barres de fer plat de $0^m,13$ de largeur sur $0^m,027$ d'épaisseur; les essieux sont amenés, toujours au marteau et sans faire usage de l'étampe, aux dimensions qu'il convient de leur donner pour les mettre sur le tour; c'est généralement à cet état que les forges les livrent aux administrations des chemins de fer. Le fer employé à la fabrication des essieux doit avoir été préparé au charbon de bois et forgé au marteau.

Fig. 79.




On fabrique en Angleterre d'excellents essieux au moyen de trousses ou paquets, dont le bout est représenté fig. 79. Une barre ronde *b*, en fer de qualité supérieure, est placée au centre; d'autres, *c*, qui l'entourent, ont la forme de voussoirs, et le tout est maintenu par deux petits cercles placés aux extrémités de la trousse.

Ainsi composée, la trousse est chauffée au blanc dans un four à réverbère, puis passée au laminoir. Elle est ensuite martelée. On en coupe les extrémités à la scie circulaire, et des bouts qu'on en retire

on fabrique au laminoir des barres rondes qui servent pour d'autres trousses.

Les essieux de grandes dimensions sont soudés à l'aide d'un marteau qui pèse de 4 à 5 tonnes. Deux chaudes suantes suffisent pour souder dans toute sa longueur un essieu semblable à ceux dont on se sert sur le chemin de Bristol, à voie de 7 pieds. Il faut ensuite deux autres chaudes modérées pour terminer l'essieu.

Le fer qui compose les essieux formés de cette manière est entièrement nerveux. On peut faire à froid, avec les barres, le premier passage d'un nœud ordinaire, sans qu'il se manifeste la moindre altération à la surface. Ces essieux se vendent 95 fr. le quintal métrique pris à l'usine.

Depuis quelque temps, on emploie en Allemagne des essieux en acier fondu, qui paraissent donner de bons résultats.

L'alliage blanc, composé de zinc, d'antimoine, d'étain et d'un peu de cuivre, est assez généralement préféré en Angleterre pour les coussinets de boîtes à graisse. En France, au contraire, on y a renoncé pour donner la préférence au bronze, composé de 82 de cuivre pour 18 d'étain.

Il est probable que le métal blanc employé en France est de moins bonne qualité que celui dont on se sert en Angleterre.

Sur le chemin de fer dit South-Western, en Angleterre, on intercale avec avantage des bandes de cuir le long des rainures de la boîte à graisse, entre lesquelles frotte la plaque de garde.

Le prix courant des boîtes à graisse à grandes fusées, avec coussinets en bronze, est de 25 à 30 fr.

Les ressorts se faisaient en acier de cémentation, et leur prix était, il y a 10 ans, 2f,40 le kilog.; aujourd'hui, ils se font en acier fondu, et ils ne coûtent à Paris que 2f,20 le kilog.

Les roues ont 1 mètre de diamètre. Deux roues montées sur le même essieu doivent avoir le même diamètre; on ne doit tolérer pendant la marche qu'une différence de 0m,001, car autrement, à cause de la fixité des roues sur l'essieu, une des roues produirait un frottement de glissement considérable sur le rail.

Aux chemins de Versailles (rive droite) et de Saint-Germain, des roues ayant 1 mètre de diamètre ont 0m,12 de largeur de jante, y compris le rebord. Dans les anciennes roues anglaises, la largeur de la jante n'était que de 0m,10; mais dans les nouveaux modèles, on l'a portée à 0m,13, afin de diminuer le frottement du rebord de la roue contre le rail; c'est la largeur adoptée sur plusieurs grandes lignes françaises.

Les rais, ainsi que la partie du pourtour de la roue à laquelle est fixé le rebord, sont le plus souvent en fer malléable; quelquefois cependant,

mais pour le transport des marchandises seulement, ils sont coulés avec le moyeu, comme pour les wagons de terrassement (439).

La conicité donnée au pourtour de la jante dépend du rayon des courbes qui se trouvent sur le chemin et de la vitesse de circulation. Sur le chemin de Londres à Birmingham, pour un rayon de au moins 1000 mètres, à l'exception d'une courbe qui est d'un rayon plus petit, l'inclinaison du bandage est de 1/13; sur le chemin de Versailles (rive gauche), le rayon minimum étant de 1200 mètres, cette inclinaison est de 1/12; et sur le chemin de Bâle à Strasbourg, où les courbes sont en petit nombre et d'un très-grand rayon, cette inclinaison est de 1/25. Pour les voitures, les bandages doivent avoir, à l'état brut, $0^m,035$ à $0^m,040$ d'épaisseur dans la partie la plus mince, et pour les locomotives $0^m,045$ à $0^m,050$. Dans ces derniers temps, ces épaisseurs ont encore été augmentées.

Le rebord de la jante doit être fort et calculé de manière qu'il soit usé en même temps que la jante, avec laquelle il se raccorde par un congé très-allongé; le rebord doit être d'autant plus fort qu'il y a plus de courbes sur le chemin et que les rayons de ces courbes sont plus petits. Comme la jante se creuse au milieu, il convient de ménager un chanfrein de $0^m,01$ de largeur sur tout son pourtour extérieur ou d'augmenter l'inclinaison du bandage vers l'extérieur (le rebord est à l'intérieur de la voie).

Le bandage se compose quelquefois de deux cercles superposés, un qui s'appuie sur les rails et un autre qui porte le rebord.

On a fabriqué dans les usines françaises, notamment à Hayange, des bandages composés de deux espèces de fer pour ainsi dire soudés ensemble : l'une, nerveuse, qui doit être placée vers l'intérieur de la roue; l'autre, grenue, qui doit former la partie extérieure du bandage. L'épaisseur du nerf est de un tiers à moitié de celle du grain.

Les bandages le plus généralement employés en Angleterre sont à cassure homogène, d'un grain fin, aciéreux, bleuâtre. On les fabrique, pour la plus grande partie, dans les usines du Yorkshire, à Lowmoor et Bowling.

Les bandages anglais sont très-tenaces; les bandages français le sont moins. Les premiers paraissent avoir plus de durée que ces derniers.

Sur quelques chemins anglais, celui de Bristol entre autres, les bandages sont en acier. Ils font un bon service, mais ils sont coûteux et sujets à se rompre; de plus, leur élasticité les fait se redresser en cas de rupture.

En Angleterre, on soumet quelquefois les bandages à un laminage supplémentaire, ce qui leur donne les avantages et les inconvénients des bandages en acier.

Des bandages de cette espèce, après avoir parcouru 32 000 kilomè-

tres, n'avaient perdu que 5 livres en poids, tandis que les bandages ordinaires perdent 15 livres.

Les rais sont en fer plat, employé de manière à former ordinairement des triangles dont les sommets se logent dans le moyeu, et dont les bases s'appuient contre la jante; quelquefois, les trois côtés de ces triangles sont curvilignes, ce qui augmente l'élasticité; d'autres fois, la base seule est courbe. Il y a quelques années, les cercles se tournaient à l'intérieur comme à l'extérieur; mais aujourd'hui, on les forge avec une telle perfection que le tournage intérieur est inutile; il convient de préparer à la grosse lime la face des rais qui repose sur le cercle. Les bandes à rebord sont fixées au pourtour de la roue par des rivets coniques qui traversent tout le bandage. On a fait usage pour les roues de machines et tenders sans faux-bandages, de vis qui ne pénétraient que jusqu'aux deux tiers de la profondeur du bandage; mais ces vis se desserraient, et on leur a substitué des boulons qu'on rive légèrement sur leurs écrous.

Une roue bien faite, lorsqu'on la frappe sur les rais avec une baguette en fer, rend un son vibrant, analogue à celui d'une cloche.

A l'étranger, on rencontre des roues où les rais en fer sont remplacés par un disque plein en bois, en fonte ou en tôle; cette dernière disposition vient d'être mise en pratique en France par M. Cavé.

*Chemin de Strasbourg.* (Extrait du cahier des charges.)

Les dimensions suivantes seront rigoureusement suivies sans tolérance :

| | |
|---|---|
| Diamètre de l'essieu au calage. . . . . | 0m,110 |
| Écartement des bandages des roues. . . . . | 1 ,362 |
| Distance d'axe en axe des fusées. . . . . | 1 ,907 |
| Diamètre des fusées. . . . . | 0 ,065 |
| Longueur des fusées. . . . . | 0 ,127 |
| Inclinaison de la surface des bandages. . . . . | 1/20 |
| Largeur des entailles des clefs. . . . . | 0 ,025 |
| Épaisseur des clefs en acier. . . . . | 0 ,015 |

L'épaisseur des bandages devra être de 0m,04 au moins. Au milieu, cette épaisseur pourra être plus forte, pourvu que le profil extérieur s'accorde avec le gabarit, et que les deux roues montées sur le même essieu aient rigoureusement le même diamètre.

Il sera remis au fournisseur un gabarit pour la section des bandages des roues, et un autre pour vérifier les fusées des essieux, leur écartement, etc.

Le trou des moyeux de chaque roue sera alésé tellement juste qu'il pourra s'adapter indistinctement à tous les essieux, et son frottement sera tellement dur, qu'il ne pourra ni s'y placer, ni en être retiré qu'à l'aide d'une puissante presse mécanique ou hydraulique quelconque. (La pression employée pour faire pénétrer l'essieu dans le moyeu est de 40 000 kil. environ; elle rend les clavettes à peu près inutiles.)

Les essieux seront tournés sur toute leur longueur. Les parties coniques et les parties cylindriques du milieu de l'essieu seront dégrossies au tour. La position et la dimension des fusées et des parties porte-roues devront être parfaitement identiques, sans tolérance. Les entailles des clefs seront parfaitement alignées et parallèles à l'axe de l'essieu.

Les bandages seront tournés sur toutes leurs faces.

Les clefs en acier seront exactement calibrées, et leurs entailles sur l'essieu seront parfaitement dressées, de manière que les clefs portent d'un bout à l'autre sur toutes leurs faces.

Les essieux seront en fer purement au bois de première qualité, corroyé au marteau, et provenant de fonte au bois pur. Ils peuvent être soumis aux épreuves adoptées pour les essieux de l'artillerie (432).

Chaque essieu sera forgé avec un excédant de longueur de 5 à 6 centimètres à chaque bout. Cet excédant, après avoir été réduit sur le tour au diamètre d'environ 30 à 35 millimètres, sera rogné de la manière qui sera indiquée par l'agent de la compagnie chargé de suivre la fabrication.

Tout essieu dont la fracture, à ses deux extrémités, n'annoncerait pas un fer nerveux et bien soudé, pourra être refusé.

Les fragments, marqués au nom du fabricant et au numéro de l'essieu dont ils proviennent, seront conservés par la compagnie comme pièces justificatives de la qualité des fers employés.

*TABLEAU des dimensions ordinaires des roues et essieux de wagons.* (Extrait du *Traité des machines à vapeur* de M. Gaudry.)

| | |
|---|---|
| Diamètre des roues au roulement | 1m,00 |
| Épaisseur du bandage rapporté | 0 ,04 à 0m,05 |
| Largeur *id.* | 0 ,14 à 0 ,15 |
| Longueur *id.* | 0 ,18 à 0 ,20 |
| Diamètre du moyeu en fonte | 0 ,30 |
| Nombre des bras en fer plat de 0m,013 à 0m,016 d'épaisseur sur 0m,075 à 0m,080 de largeur | 7 à 10 |
| Diamètre de l'essieu, au calage | 0m,11 à 0m,12 |
| *Id.* au milieu | 0 ,09 à 0 ,10 |
| *Id.* à la fusée | 0 ,06 à 0 ,08 |
| Longueur de la fusée | 0 ,12 à 0 ,17 |
| Écartement des essieux | 2 ,40 à 3 ,35 |
| Poids d'un essieu | 130k à 160k |
| Poids d'une roue | 310 à 380 |
| Poids d'une paire de roues sur son essieu | 725 à 875 |
| Écartement latéral intérieur des roues | 1m,37 à 1m,38 |
| Prix par 100 kilog. | 85f à 130f |

Nous extrayons les quelques chiffres suivants, relatifs au chemin de fer du Nord, d'un mémoire publié par M. Nozo, ingénieur des ateliers de ce chemin, dans le *Bulletin de la Société centrale des ingénieurs civils.*

Au chemin de fer du Nord, il faut retourner environ 7500 à 8000 paires de roues montées, et fabriquer et poser 1900 à 2000 bandages par année.

L'expérience a démontré que les roues sans faux cercle résistent moins bien et sont d'un entretien plus coûteux que celles à faux cercle.

Les premières fusées des essieux montés des wagons avaient 0m,060 de diamètre et 0m,127 de longueur; mais l'expérience a prouvé que pour de longs parcours et de grandes vitesses, des fusées aussi petites s'échauffent, et on a porté leur diamètre à 0m,075 et leur longueur à 0m,200. Les premières étaient remplacées par ces dernières dès qu'elles pénétraient dans une auge de 0m,057 de diamètre.

Les fusées de tenders avaient, à l'origine de l'exploitation, $0^m,080$ de diamètre et $0^m,180$ de longueur. Dès que ces fusées pénétraient dans un calibre jauge de $0^m,076$ de diamètre, les essieux étaient remplacés par d'autres dont les fusées avaient $0^m,095$ de diamètre et $0^m,190$ de longueur.

Pour les essieux montés de support des machines système Stephenson, les fusées, qui sont intérieures, avaient primitivement $0^m,140$ de diamètre et $0^m,160$ de longueur; on leur a conservé le même diamètre, mais on a porté leur longueur à $0^m,170$. Quant aux essieux moteurs, on a donné aux fusées, qui sont également intérieures, $0^m,160$ de diamètre et $0^m,150$ de longueur.

Pour les machines à grande vitesse, système Crampton, les fusées, qui sont extérieures, des essieux d'avant ont $0^m,150$ de diamètre et $0^m,300$ de longueur; celles de l'essieu du milieu, qui sont extérieures aussi, ont $0^m,130$ de diamètre sur $0^m,252$ de longueur, et celles des essieux moteurs, qui sont intérieures, ont $0^m,180$ de diamètre sur $0^m,260$ de longueur.

Les bandages sont généralement maintenus en service tant qu'ils conservent d'épaisseur, après dernier rafraîchissage au tour, $0^m,030$ pour roues motrices, $0^m,025$ pour roues de support et tenders, et $0^m,020$ pour roues de voitures et wagons.

La plupart des bandages arrivent à ces épaisseurs limites après trois rafraîchissages pour les machines ou tenders, et quatre pour les wagons.

Le parcours moyen des bandages, depuis la mise en service jusqu'à la mise au rebut, est approximativement :

| | | |
|---|---|---|
| Bandages | de voitures et wagons. . . . . | 50000 kilom. |
| *Id.* | de roues de support. . . . . | 50000 |
| *Id.* | de roues motrices. . . . . | 45000 |
| *Id.* | de roues de tenders. . . . . | 35000 |

L'épaisseur du bandage a été portée à $0^m,055$ pour toutes les roues, wagons et locomotives; la largeur totale du bandage est $0^m,130$ pour les wagons et $0^m,140$ pour les locomotives; l'inclinaison de la surface est de 1/20, et depuis environ l'aplomb de la face extérieure du rail, c'est-à-dire sur à peu près $0^m,035$, cette inclinaison est de 3/20.

**343.** *Châssis de voitures à voyageurs de 1re, 2e et 3e classe.* (Extrait du cahier des charges du chemin de fer de Strasbourg.)

Chaque châssis devra pouvoir s'ajuster indistinctement sur tous les essieux, et recevoir, sans aucune modification, toutes les caisses de voitures de la même classe.

8 boulons, dont la position sera rigoureusement fixée à l'aide d'un gabarit en fer, d'après les indications des ingénieurs, fixeront la caisse au châssis.

Le châssis se compose d'un cadre en charpente formé de deux brancards de $0^m,25$ sur $0^m,11$, reliés par 5 traverses de $0^m,25$ sur $0^m,10$, et par un système de croix de Saint-André, dont la face supérieure affleure la face supérieure des brancards.

Les plaques de garde seront fixées à l'intérieur des brancards par 4 boulons chacune, dans une entaille de 1 centimètre de profondeur.

Tous les boulons seront goupillés afin d'empêcher les écrous de se desserrer.

Les ressorts seront en acier à ressorts de première qualité (442), lames étirées et assemblées *sans séparation entre elles;* chaque lame sera reliée à sa voisine par des étoquiaux. Ils seront reliés au châssis par des mains en cuir et par des vis de rappel traversant des supports en fer forgé invariablement fixés aux brancards (fig. 78).

(Les chaînes d'attelage doivent être en bon fer à câbles; mais il ne paraît pas nécessaire que toutes les ferrures soient en fer fabriqué au charbon de bois et au marteau, comme l'exige le cahier des charges par les voitures de plusieurs chemins de fer; cette condition ne devrait s'appliquer qu'aux ferrures qui fatiguent le plus.)

*Caisses.* Sur le chemin de Paris à Strasbourg, les caisses des voitures de 2e classe ont 1m,58 de longueur, tandis que celles du Nord n'ont que 1m,48.

Sur le chemin de Lyon, les voitures sont à 6 roues, comme au chemin d'Avignon à Marseille, et les caisses des voitures de 2e classe ont 1m,64 de longueur (440).

Au chemin de fer du Nord, dans les voitures de 3e classe, une banquette règne sur tout le pourtour de la voiture, et il y a en outre au milieu deux banquettes placées en long comme dans les omnibus. Le public ne peut entrer ou sortir que par deux portières de chaque côté, ce qui est insuffisant.

*TABLEAU des principales dimensions intérieures des caisses de voitures à voyageurs, sur quelques lignes.*

| CHEMINS. | 1re CLASSE. | | | 2e CLASSE. | | | 3e CLASSE. | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Longueur. | Largeur. | Hauteur. | Longueur. | Largeur. | Hauteur. | Longueur. | Largeur. | Hauteur. |
| | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. |
| Paris à Strasbourg. . . | 1.74 | 2.26 | 1.75 | 1.58 | 2.26 | 1.75 | 1.33 | 2.28 | 1.70 |
| Nord. . . . . | 1.80 | 2.40 | 1.75 | 1.48 | 2.26 | 1.75 | Omnibus. | | |
| Amiens à Boulogne. . . | 1.80 | 2.40 | 1.75 | 1.76 | 2.26 | 1.75 | 1.32 | 2.26 | 1.75 |
| Paris à Lyon. . . . . | 1.75 | 2.40 | 1.75 | 1.84 | » | 1.75 | | | |
| Paris à Orléans (dernier modèle). . . . . | 1.70 | 2.40 | 1.38 | 1.55 | 2.26 | 1.55 | | | |
| Paris à Rouen . . . . . | 1.60 | 2.10 | 1.45 | 1.50 | 2.26 | 1.56 | 1.50 | 2.29 | » |

(*Extrait du cahier des charges du chemin de fer de Strasbourg*). Les caisses des voitures à voyageurs seront rigoureusement conformes aux plans d'ensemble remis aux fournisseurs, revêtus de la signature des administrateurs et joints au traité.

Chaque caisse devra s'ajuster indistinctement sur tous les châssis de voitures de la même classe.

Les bois employés seront de premier choix, sans nœuds vicieux, roulures, malandres, fils tranchés, ou autres défauts; ils auront au moins 3 années de coupe, dont un an au moins de débit en plateaux; dans cet état de sécheresse, et 3 mois avant la construction des caisses, ces plateaux seront réduits aux dimensions voulues, suivant les plans de la compagnie.

Les brancards seront en chêne; les battants des pavillons, les pieds et les travaux de toute espèce seront en chêne ou en frêne; on ne fera usage de l'orme ou du hêtre que pour les petites traverses de remplissage; les baguettes seront en noyer.

Les châssis à glaces, les ventilateurs et la frise intérieure seront en acajou. Ces châssis devront tous avoir exactement les mêmes dimensions, afin de pouvoir servir indistinctement à toutes les voitures d'une même classe, il en sera de même de toutes les pièces mobiles des diverses caisses.

Les panneaux extérieurs seront en tôle forte de première qualité, pesant 7k,25 le mètre carré, bien planée, de manière à présenter une surface parfaitement unie.

Tous les pavillons seront couverts en feuilles de zinc n° 14, de la meilleure qualité. Les gouttières seront en cuivre, s'engageant sous le zinc et se reliant à des corniches.

Il sera ménagé dans les pavillons de 1re classe, et au milieu de chaque compartiment, une ouverture pour recevoir une lampe d'intérieur.

Toutes les ferrures seront faites en fer au bois de la meilleure qualité, ou en fers corroyés dont la qualité aura été constatée et approuvée par les ingénieurs de la compagnie. Elles seront travaillées et parées avec soin, sans brûler, suivant les règles de l'art.

La peinture sera faite avec les plus grands soins et avec des couleurs de qualité supérieure; on emploiera, pour les premières couches, du vernis de première qualité, et pour la dernière, du vernis anglais pur.

Pour les voitures de 1re classe, la peinture sera faite conformément au détail suivant :

Deux couches d'impression à la céruse;
Six couches d'apprêts pour poncer;
Poncer à l'eau jusqu'à l'impression;
Une couche de céruse, teintée selon la couleur des fonds;
Mastiquer au vernis et poncer;
Une seconde couche de céruse;
Remastiquer et poncer;
Deux couches de fond;
Un glacis au vernis;
Une couche de vernis et polir;
Une couche de venis, polir à fond;
Dorer, réchampir et filer;
Vernir au vernis anglais;
Les panneaux noirs, après avoir été apprêtés, recevront quatre couches, dont la première de noir de fumée, la deuxième de noir d'ivoire, les deux dernières de noir du Japon;
Tous les bois intérieurs, non apparents, recevront une couche à l'huile.

Toute la garniture sera rembourrée de crin blond de la plus belle qualité. Le drap sera doublé de toile, pour empêcher le crin de sortir.

(Aujourd'hui, on n'emploie que 55 à 60 kilog. de crin pour chaque caisse d'une diligence; ce crin vaut de 3f,50 à 4 fr. le kilog. à Paris. On donne la préférence au drap couleur noisette, qui ne coûte que 11 à 12 fr. le mètre.)

*Conditions applicables aux caisses de 2e classe.* Les voitures de 2e classe seront divisées en 3 caisses, dont chacune sera desservie par deux portières et pourra contenir 10 voyageurs.

Il sera ménagé aux deux cloisons une ouverture pour recevoir une lampe d'intérieur.

Les caisses seront garnies en fort coutil de fil rayé.

La rembourrure sera faite en deux couches : la première de filasse, l'autre de crin.

Par voiture, on emploiera 60 kilog. de filasse et 30 kilog. de crin de bonne qualité.

La peinture sera faite de la manière suivante :

Une couche d'impression à la céruse;

Six couches d'apprêts ;
Poncer à l'eau jusqu'à l'impression ;
Mastiquer au vernis, poncer les mastics et reboucher au mastic à l'huile ;
Trois couches de teinte ;
Une couche de vernis gras à polir ;
Réchampir et filer ;
Vernir une deuxième fois au vernis anglais pur ;
Les panneaux noirs, après avoir été apprêtés, recevront trois couches, dont une de noir d'ivoire, et le vernis anglais ;
Toutes les parties intérieures seront peintes de trois couches de couleur bois à l'huile, et rebouchées avec soin ;
Tous les bois intérieurs, avant d'être recouverts par la garniture, seront peints d'une couche à l'huile ;
Les châssis vitrés seront peints de trois couches à l'huile, polis et vernis.

*Conditions applicables aux voitures de 3e classe.* Les voitures de 3e classe seront divisées en 4 caisses, dont chacune pourra contenir 10 voyageurs et sera desservie par deux portières.

Les voitures seront couvertes, et fermées latéralement par des rideaux.

Il n'y aura pas de garniture intérieure.

La peinture sera faite conformément au modèle suivant :

Une couche d'impression à la céruse ;
Cinq couches d'apprêts ;
Poncer à l'eau jusqu'à l'impression, et passer une couche de céruse grise ;
Mastiquer au vernis, poncer les mastics et reboucher au mastic à l'huile ;
Deux couches de teinte ;
Une couche de vernis gras et polir ;
Réchampir et filer ;
Vernir une dernière fois au vernis anglais pur ;
Les panneaux noirs, après avoir été apprêtés, recevront deux couches, dont une de noir d'ivoire, et le vernis anglais ;
Tout l'intérieur de la caisse, y compris les banquettes, sera peint de trois couches à l'huile, de couleur bois, et rebouché avec soin.

Les caisses seront livrées montées sur leurs châssis garnis des roues et essieux ; le tout complet, peint et prêt à fonctionner.

Les frais de transport et autres, s'il y en a, jusqu'à la livraison, seront à la charge du fournisseur.

La compagnie se réserve le droit de faire suivre la construction par ses ingénieurs.

Le prix de chaque caisse complète sera payé, savoir : neuf dixièmes après sa réception, et un dixième après le délai de garantie.

Pour les teintes vertes, on emploie le vert-de-gris de préférence au vert de Scheele ; pour les teintes jaunes, on emploie le jaune de chrôme ; pour les bleues, le bleu de Prusse ; pour les brunes, le rouge de Van Dyck mélangé, suivant les teintes, de noir d'ivoire, de terre d'ombre ou de terre de Cologne, avec jaune d'ocre ou terre de Sienne.

En Angleterre, on fait un assez grand usage du *papier mâché* pour les panneaux des voitures de voyageurs et le doublage intérieur des caisses. Pour les wagons à marchandises construits en bois de chêne, on se contente souvent d'une peinture à l'huile bouillante, qui paraît préférable à la peinture ordinaire. Les voitures en bois de *teak* sont seulement vernies.

## RÉSISTANCES AU MOUVEMENT DES WAGONS.

*444. Résistance due au frottement des essieux.* La résistance que ce frottement oppose directement à la marche d'un wagon est exprimée par

$$R_1 = fP\frac{d}{D}. \qquad (452)$$

$R_1$ résistance que le frottement des essieux oppose directement à la traction qui sollicite le wagon ;
P pression des fusées sur les boîtes ;
$f = 0.05$ coefficient du frottement des essieux dans leurs boîtes, le graissage se faisant très-bien et d'une manière continue (63) ;
$d$ diamètre des fusées des essieux ;
D diamètre des roues ;

Le rapport $\frac{d}{D}$ était de 1/20 pour les anciens wagons ; aujourd'hui, il est généralement de 1/14 environ pour les wagons de service et les voitures pour voyageurs (442).

*445. Résistance due au frottement qui s'exerce au pourtour des roues.* Cette résistance étant représentée par $R_2$, on a

$$R_2 = f'(P + p). \qquad (452)$$

P poids qui repose sur les roues ;
$p$ poids des roues et essieux ;
$(P + p)$ poids total du wagon (441) ;
$f' = 0.001$ environ coefficient du frottement de roulement des roues de $0^m,90$ de diamètre sur les rails (60 et 453).

*446. Résistance que l'air oppose au mouvement des wagons.* Des expériences faites à Brest par M. Thibault, lieutenant de vaisseau, il résulte que la résistance de l'air contre la base d'un prisme droit à base carrée, dont les arêtes latérales sont placées dans la direction du mouvement, est exprimée par

$$R_3 = 0\varepsilon AV^2. \qquad (a)$$

$R_3$ résistance que l'air oppose au mouvement du prisme, en kilogrammes ;
$0 = 0.0625$ coefficient constant ;
$\varepsilon$ coefficient qui dépend du rapport de la longueur du prisme au côté de sa base :
Si la longueur du prisme est égale à trois fois le côté de la base. $\varepsilon = 1.10$
Si elle lui est égale, c'est-à-dire si le solide est un cube. . . . $\varepsilon = 1.17$
Si elle est beaucoup plus petite (plaque mince). . . . . $\varepsilon = 1.43$
A base du prisme en mètres carrés ;
V vitesse du prisme par rapport à l'air, en mètres par seconde.

Des expériences de M. Thibault, il résulte aussi qu'en plaçant deux surfaces carrées, se masquant exactement, l'une derrière l'autre, la résistance de l'air contre la seconde surface est nulle quand celle-ci n'est

séparée de la première que d'un très-petit espace, et qu'elle est les $\frac{7}{10}$ de celle contre la première quand l'écartement est égal au côté de la surface. Si la seconde surface avait une section plus grande que la première, on pourrait calculer la résistance de l'air en remarquant qu'une partie de cette surface est frappée directement par l'air, et que l'autre portion est masquée par la première comme dans le cas précédent.

Des expériences de M. Thibault, il résulte encore que pour une surface A, faisant un angle $\alpha$ avec la direction du mouvement, la résistance de l'air est égale à celle qui aurait lieu contre la projection $A \sin\alpha$ de la surface A sur un plan perpendiculaire à la direction du mouvement.

M. de Pambour, en appliquant les résultats de M. Thibault et ceux obtenus antérieurement par Dubuat à la résistance que l'air oppose au mouvement des convois sur les chemins de fer, est arrivé aux résultats suivants :

*Surface qu'un wagon présente au choc de l'air* (455), *elle se compose :*

| | Pieds car. |
|---|---|
| 1° De la surface du chargement, qui est très-variable. . . . . | » |
| 2° De la surface de projection du wagon proprement dit, surface qui est ordinairement, pour un wagon à simple plate-forme et pour une largeur de voie de 4 pieds 8 pouces 1/2 anglais. . . . . | 14,33 |
| 3° De la surface due à la résistance que les rais des roues éprouvent à se mouvoir. M. de Pambour, en remarquant que tous les points des rais n'ont pas la même vitesse, estime cette surface à 1,25 pied carré pour une roue ordinaire de 3 pieds de diamètre ; ce qui fait, pour les deux roues de devant, 2,50 pieds carrés, et comme chaque rais masque le suivant, il réduit la surface précédente d'un tiers, ce qui donne. . . . . | 1,67 |
| 4° De la surface due à ce que les roues, les essieux, les ressorts et les boîtes à graisse de derrière ne sont pas masqués complétement par les mêmes pièces de devant. M. de Pambour estime la surface de ces pièces, y compris celle de 2,50 pieds due au mouvement des rais, à 7,03 pieds carrés, et en la réduisant d'un tiers, pour tenir compte de ce que ces pièces sont en partie préservées par les pièces semblables de devant, il obtient. . . . . | 4,69 |
| La surface totale des plus hauts wagons, y compris celle de la charge, est estimée, pour les voies de 5 pieds (1m,524) environ de largeur, à. . | 70 ou 74 |
| Pour les diligences, cette surface totale est de. . . . . | 60 à 64 |

Ainsi, pour un wagon offrant une surface directe de 70 pieds carrés = 6,503 mètres carrés à l'action de l'air, la formule ($\alpha$) devient, en remarquant que pour un wagon chargé, la longueur étant moyennement égale à une fois et demie la racine carrée de la surface antérieure, il convient de faire $\varepsilon = 1{,}15$,

$$R_3 = 0{,}0625 \times 1{,}15 \times 6{,}503 V^2.$$

Pour un convoi de plusieurs wagons, il faut, d'après ce qui précède,

compter, pour la surface directe opposée à l'air, 70 pieds carrés pour le premier wagon, plus $4,69 \times 2 = 9,38$ pieds carrés pour les pièces de charronnage de chacun des wagons suivants. De plus, les wagons étant séparés entre eux de 2 pieds environ, l'air exerce encore une certaine résistance sur la face antérieure de chacun des wagons qui suivent le premier. M. de Pambour, de concert avec M. E. Wood, ingénieur du chemin de fer de Liverpool à Manchester, pour déterminer cette résistance, a opéré sur 5 wagons qu'il a fait descendre sur un plan incliné, d'abord séparément et ensuite réunis en convoi, et il a trouvé cette résistance égale à celle due à 3 pieds carrés de surface directe, ce qui fait par wagon intermédiaire $3/4 = 0,75$ pied carré. Cette surface, ajoutée à celle due aux pièces de charronnage, donne 10,13 pieds carrés, soit 10 pieds carrés de surface directe par wagon, non compris le premier. Dans ces expériences, la longueur du prisme formé par les 5 wagons réunis étant égale à sept fois la largeur, M. de Pambour, pour déterminer la résistance due à l'air, a pris, conformément aux observations de Dubuat, $\varepsilon = 1,07$; pour les wagons séparés, il a fait $\varepsilon = 1,15$.

D'après ce qui précède, pour un convoi de wagons, il faudra donc prendre pour surface directe opposée à l'air, d'abord 70 pieds carrés pour le premier wagon et ensuite 10 pieds carrés pris autant de fois qu'il y a de wagons placés à la suite du premier; dans le nombre des wagons on comprend la locomotive et son tender. Pour un convoi de diligences, il suffirait de remplacer 70 pieds carrés par 60 dans l'évaluation précédente. La surface ainsi déterminée et transformée en mètres carrés étant substituée dans la formule $(a)$, on en conclura la résistance due à l'air en faisant $\varepsilon$ égal à 1,15 pour un wagon, à 1,07 pour 5 wagons, à 1,05 pour 15 et à 1,04 pour 25.

M. de Pambourg estime que si les roues, au lieu d'avoir, comme elles ont ordinairement, 3 pieds de diamètre, en avaient 5, il faudrait augmenter la surface directe opposée à l'air de 3 pieds carrés par wagon.

*Application.* Soit à déterminer la résistance due à l'air, pour un convoi composé de 15 wagons, la surface directe opposée à l'air par le plus grand wagon étant de 70 pieds carrés (6,503 mètres carrés), la surface directe due à chacun des autres wagons étant de 10 pieds carrés (0,929 mètre carré), et la vitesse étant de 40 kilomètres à l'heure, ce qui fait $11^m,11$ par seconde.

Remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule $(a)$, on a

$$R_3 = 0,0625 \times 1,05 (6,503 + 0,929 \times 14) 11,11 \times 11,11 = 158 \text{ kilog.}$$

**447.** *Résistance totale à la traction sur un chemin horizontal et en ligne droite.* Représentant cette résistance par R, on a, d'après les numéros précédents (444), (445) et (446), et en conservant aux lettres les mêmes significations que dans ces numéros,

$$R = fP\frac{d}{D} + f'(P+p) + 0{,}\varepsilon AV^2.$$

**448.** *Résistance totale à la traction sur un chemin en pente et en ligne droite.* Cette résistance est (75, 444, 445 et 446)

$$fP\cos\alpha \times \frac{d}{D} + f'(P+p)\cos\alpha + 0{,}\varepsilon AV^2 \pm (P+p)\sin\alpha.$$

$\alpha$ angle que fait le plan incliné avec l'horizon;

$P\cos\alpha$ composante du poids P, normale au plan incliné; c'est la pression des fusées sur leurs boîtes;

$(P+p)\cos\alpha$ composante du poids total des wagons, normale au plan incliné; c'est la pression des roues sur les rails;

$(P+p)\sin\alpha$ composante du poids du convoi, parallèle au plan incliné; elle est positive ou négative suivant que le convoi monte ou descend.

Pour les cas ordinaires des chemins de fer, on peut, sans erreur sensible, supposer $\cos\alpha = 1$, et alors l'expression de la résistance à la traction, sur un chemin en pente et en ligne droite, devient

$$fP\frac{d}{D} + f'(P+p) + 0{,}\varepsilon AV^2 \pm (P+p)\sin\alpha.$$

Il suffit que la pente du chemin soit de $\frac{1}{200}$ environ pour que le convoi descende seul, et lorsqu'elle atteint $\frac{1}{50}$, un convoi chargé descendant peut faire remonter un même convoi vide.

**449.** *Résistances dues aux courbes.* Outre les résistances précédentes (447 et 448), la courbure de la voie donne naissance à trois frottements de glissement.

*Le premier de ces frottements est dû à la fixité des roues sur l'essieu.* Une des roues glisse sur les rails sur une distance égale à la différence de longueur des deux courbes qui composent la voie. Le travail absorbé par ce frottement est, pour l'unité de poids et en remplaçant la différence de longueur des courbes par sa valeur en fonction de $a$, $r$ et $e$,

$$f''\frac{2a}{r}e.$$

$a$ demi-largeur de la voie ou demi-longueur de l'essieu; on a ordinairement $a = 0^m,75$ (n° 442);

$r$ rayon de l'arc suivi par le centre de gravité du wagon;

$e$ longueur de l'arc parcouru par le centre de gravité du wagon;

$f''$ coefficient de frottement de fer sur fer à l'état où se trouvent les jantes des roues et les rails; il est égal à 0,3 d'après Coulomb, et à 0,192 d'après M. Morin (456).

Divisant le travail précédent par l'espace parcouru, on a la résistance due au frottement précédent, qui est alors

$$f'' \frac{2a}{r}.$$

Pour un wagon, cette résistance devient, en remarquant que la moitié du poids total $P + p$ du wagon repose sur les roues qui glissent,

$$f''(P + p) \frac{a}{r}.$$

*Le deuxième frottement provient de ce que le parallélisme des essieux oblige le wagon de glisser sur les rails en tournant autour de son centre de gravité pour changer de direction.* Ce frottement et le précédent combinés absorbent, pour tout le parcours de l'arc et pour chaque unité de poids du wagon, un travail représenté par

$$f'' \sqrt{a^2 + b^2} \times \frac{e}{r}.$$

Pour un wagon ce travail est

$$f'' (P + p) \sqrt{a^2 + b^2} \times \frac{e}{r} \qquad (1)$$

Divisant par $e$, on a la résistance qui s'oppose directement au mouvement du wagon, qui est alors

$$f'' (P + p) \sqrt{a^2 + b^2} \times \frac{1}{r} \qquad (2)$$

$b$ demi-distance des essieux, ordinairement $b = 0^m,75$.

L'expression (1) fait voir que le travail absorbé par le glissement dû à la fixité des roues et au parallélisme des essieux dépend de la longueur des essieux et de leur écartement, et qu'il est proportionnel à $\frac{e}{r}$, c'est-à-dire au supplément de l'angle que font entre elles les deux parties de chemin raccordées, mais qu'il est indépendant de $r$ pour une même valeur de l'angle $\frac{e}{r}$. L'expression (2) montre que la résistance à la traction dépend également de $a$ et de $b$, mais qu'elle est en raison inverse de $r$. Ainsi pour tourner d'un certain angle, le travail absorbé par le frottement en question est indépendant de $r$, mais la résistance est en raison inverse de $r$. Cette dernière cause, à part les accidents que peut occasionner un trop petit rayon adopté pour les courbes, est ce qui fait que sur les chemins à grande vitesse la valeur de $r$ est généralement supérieure à 1000 mètres.

*Le troisième frottement est dû à la force centrifuge*, qui fait frotter les rebords des roues contre les rails.

Théoriquement la force centrifuge étant moindre que la résistance

due au frottement des wagons sur les rails, même pour les vitesses en usage et pour un rayon de 500 mètres, qui est le plus petit employé dans la construction des chemins de fer, le rebord des roues ne devrait pas frotter contre les rails. C'est en effet ce qui aurait lieu si les wagons ne sautillaient pas en marchant; mais comme cet effet se produit toujours, il en résulte un frottement qui est exprimé, pour un wagon, par

$$f''' \frac{P+p}{g} \times \frac{V^2}{r} \frac{2c}{D} \qquad (121 \text{ et } 451)$$

V vitesse du centre de gravité du wagon, en mètres par seconde ;
D diamètre de la roue, pris à l'intérieur du rebord ;
c distance horizontale de la verticale passant par le centre de gravité de la roue, au point où la partie frottante du rebord de la roue commence à toucher la face latérale du rail ;
$f'''$ coefficient du frottement du rebord de la roue contre le rail (450).

**450.** *Résistance totale qui s'oppose au mouvement d'un wagon sur une courbe en pente.* Cette résistance est égale à la somme de toutes les résistances précédentes (444 à 449) ; elle est donc

$$R = fP\frac{d}{D} + f'(P+p) + \theta\varepsilon AV^2 + f''(P+p)\sqrt{a^2+b^2}\frac{1}{r} + f'''\frac{(P+p)}{g} \times \frac{V^2}{r}\frac{2c}{D} \pm (P+p)\sin\alpha$$

$f$ = 0,05 (444);
$\frac{d}{D}$ = de 1/12 à 1/20, c'est ordinairement 1/14 (n° 444) ;
$f'$ = 0,001 (n° 445) ;
$\theta$ et $\varepsilon$ (n° 446) ;
$f''$ = 0,03 d'après Coulomb, et 0,192 d'après M. Morin (456);
$(P+p)$ (n° 441) ;
$a = b = 0^m,75$, et $\sqrt{a^2+b^2} = \sqrt{1,12} = 1$ à peu près (449);
$f'''$ n'a pas encore été déterminé par des expériences assez concluantes pour lui assigner une valeur exacte (449 et 451).

**451.** *Résultats des expériences faites sur le chemin de Roanne à Andrezieux pour déterminer le frottement dû à la force centrifuge* (449).

Vitesse du wagon, 4 lieues à l'heure.

Rayon de la courbe, 100 mètres;

Traction au dynamomètre, 0,033 $(P+p)$;

Soit $x$ le frottement dû à la force centrifuge.

Remplaçant les lettres par leurs valeurs dans la formule du n° 450, elle donne, en faisant la résistance due au frottement des essieux et au pourtour des roues égale à 0,005 $(P+p)$, comme cela a lieu ordinairement sur les chemins de fer (444 et 445), et en négligeant la résistance de l'air, qui n'est, à la vitesse de 4 mètres par seconde et quand il n'y a qu'un wagon, que de $1^k,15$ par mètre carré de la surface opposée directement à l'air (446),

$$0{,}033(P+p) = 0{,}005\,(P+p) + \frac{0{,}3\sqrt{1{,}12}}{100}(P+p) + x,$$

d'où l'on tire

$$x = 0{,}024\,82\,(P+p),$$

résistance égale à trois fois celle due aux autres frottements.

Il conviendrait de reprendre ces expériences en se plaçant mieux dans les conditions habituelles des chemins de fer.

*432. Moyens pour déterminer le frottement total d'un wagon.*

*Le premier moyen* consiste à faire descendre librement un wagon sur un plan incliné et à constater l'espace parcouru pendant un certain temps (448).

Le wagon est soumis à l'action de deux forces : l'une, accélératrice, due à l'action de la pesanteur, et qui est $(P+p)\sin\alpha$, composante du poids du wagon parallèle au plan incliné (75); l'autre, retardatrice, qui est le frottement du wagon. Sous l'influence de ces forces, le wagon prend un mouvement accéléré (11 et suivants), et après un certain temps on a, en remarquant que dans ce cas l'accélération de la vitesse est à l'accélération $g$ due à la pesanteur dans le rapport de $(P+p)\sin\alpha - x$ à $P+p$.

$$E = \frac{1}{2} g \frac{(P+p)\sin\alpha - x}{P+p} T^2,$$

d'où

$$x = (P+p)\sin\alpha - \frac{2E}{gT^2}(P+p).$$

Cette valeur de $x$ serait exacte si tout le système n'était doué que d'un simple mouvement de translation; mais les roues et les essieux possédant, outre le mouvement de translation, un mouvement de rotation, il en résulte que la masse effective soumise au mouvement de translation se compose de celle dont le poids est $P+p$, plus d'une masse, laquelle, appliquée à la circonférence de la roue et ayant par conséquent la vitesse de translation, aurait, par rapport à l'axe des roues, le même moment d'inertie que les roues et essieux. Si les roues étaient des cylindres pleins de matière homogène, c'est-à-dire si les essieux remplaçaient exactement les vides laissés entre les rais, on aurait théoriquement cette masse fictive (101 et suivants). Des expériences directes de M. N. Wood, sur des essieux garnis seulement de leurs roues, ont donné 0,54 pour le rapport de cette masse fictive à la masse des roues et des essieux. La masse effective mise en mouvement par la force motrice $(P+p)\sin\alpha - x$, au lieu d'être $\frac{P+p}{g}$, étant $\frac{P+p+0{,}54p}{g}$, l'accélération réelle de vitesse est dans le rapport in-

verse de ces masses, et devient (21) $g\frac{(P+p)\sin\alpha-x}{P+p}\times\frac{P+p}{P+1{,}54p}$; on a donc, en simplifiant,

$$E=\frac{1}{2}\,g\,\frac{(P+p)\sin\alpha-x}{P+1{,}54p}\,T^2; \qquad (a)$$

d'où l'on tire

$$x=(P+p)\sin\alpha-\frac{2E}{gT^2}(P+1{,}54p).$$

E espace parcouru pendant le temps T qu'a duré l'observation;
P poids du wagon et de sa charge;
$p$ poids des roues et des essieux. On a à peu près $p=850$ kilog. pour un wagon ordinaire (442);
$\alpha$ angle que fait le plan incliné avec l'horizon;
$x$ résistance totale qui s'oppose au mouvement du wagon.

La résistance de l'air étant comprise dans la valeur de $x$, comme cette résistance est variable avec la vitesse (446), il en résulte que le mouvement n'est pas exactement uniformément accéléré, et que la formule précédente ne donne qu'une approximation.

Sur un plan incliné au centième, les wagons ordinaires prenant un mouvement uniforme après quelques tours de roues, il en résulte que sur un tel plan la composante $(P+p)\sin\alpha$ est égale à $x$, et comme l'on peut calculer facilement la valeur de la résistance de l'air, puisque le mouvement est uniforme, en retranchant cette valeur de $(P+p)\sin\alpha$, on aura la somme de toutes les autres résistances qui s'opposent au mouvement du wagon.

*Le deuxième moyen* pour déterminer le frottement total d'un wagon consiste à faire marcher librement ce wagon sur deux plans inclinés en sens inverse et se raccordant par une courbe à leur partie inférieure.

Si toutes les résistances qui s'opposent au mouvement du wagon étaient nulles, le wagon, après avoir librement descendu d'une certaine hauteur verticale sur une rampe, remonterait à la même hauteur sur l'autre. Soient :

H la descente verticale du wagon sur l'un des plans, et $\alpha$ l'angle d'inclinaison de ce plan;
$h$ la montée verticale du wagon sur l'autre plan, et $\alpha'$ l'angle d'inclinaison de ce plan;
E l'espace parcouru sur le premier plan;
E′ l'espace parcouru sur le second plan, quand le wagon cesse de monter;
$(P+p)$ le poids total du wagon et de ses roues;
$x$ la résistance totale qui s'oppose au mouvement du wagon.

L'accélération de vitesse sur le premier plan est, en supposant uniforme la résistance de l'air et en remarquant que la force $(P+p)\sin\alpha-x$ sollicite, comme dans le cas précédent, une masse effective $\frac{P+1{,}54p}{g}$,

$$g\frac{(P+p)\sin\alpha-x}{P+1{,}54p},$$

et la vitesse que possède le wagon quand il arrive au bas de ce plan est (19)

$$v=\sqrt{2g\frac{(P+p)\sin\alpha-x}{P+1{,}54p}E}.$$

Sur le second plan, l'accélération de vitesse retardatrice est, en remarquant que la force $(P+p)\sin\alpha'-x$ sollicite la même masse effective $\frac{P+1{,}54p}{g}$, mais en sens contraire du mouvement,

$$g\frac{(P+p)\sin\alpha'-x}{P+1{,}54p},$$

et quand le wagon a parcouru l'espace E', la perte de vitesse est

$$v'=\sqrt{2g\frac{(P+p)\sin\alpha'-x}{P+1{,}54p}E'}.$$

Or, comme le wagon cesse de monter, on doit avoir $v=v'$, c'est-à-dire

$$\sqrt{2g\frac{(P+p)\sin\alpha-x}{P+1{,}54p}E}=\sqrt{2g\frac{(P+p)\sin\alpha'-x}{P+1{,}54p}E'};$$

d'où l'on tire, en remarquant que $E\sin\alpha=H$ et $E'\sin\alpha'=h$,

$$x=\frac{(P+p)(H-h)}{E-E'}.$$

M. N. Wood a trouvé, par expérience, que la vitesse ne dépassant pas 4 lieues à l'heure, la valeur de $x$, résistance de l'air comprise, variait entre $\frac{1}{250}$ et $\frac{1}{200}$ (de 0,004 à 0,005) de $P+p$ pour un rapport $\frac{d}{D}$ du diamètre de la fusée à celui de la roue compris entre 1/15 et 1/13. M. de Pambour est arrivé à peu près aux mêmes résultats; il a trouvé que la valeur de $x$ était, déduction faite de la résistance de l'air, de $2^k,69$ par tonneau brut, c'est-à-dire de 0,0027 $(P+p)$, pour les roues de $0^m,915$ de diamètre et des fusées de $0^m,045$, c'est-à-dire pour un rapport $\frac{d}{D}=\frac{1}{20}$, les boîtes étant garnies de coussinets en bronze et graissées d'une manière continue.

Un *troisième moyen* consiste dans l'emploi du dynamomètre. MM. Gouin et Le Chatelier, en faisant usage du dynamomètre de M. Morin, ont trouvé, pour des wagons se rapprochant beaucoup des wagons actuels, si ce n'est que les fusées étaient d'un diamètre plus petit, que l'on avait :

$x = 0.003(P + p)$ à $x = 0.0045(P + p)$ pour des vitesses de 25 à 40 kilom. à l'heure.
$x = 0.0045(P + p)$ à $x = 0.0085(P + p)$ *id.* 40 à 60 *id.*

Et l'on peut supposer que l'on a

$x = 0.012(P + p)$ à $x = 0.015(P + p)$ pour des vitesses de 80 à 90 kilom. à l'heure.

**435.** *Expériences de* M. N. Wood. Cet expérimentateur, en enlevant les caisses des wagons, a supprimé le frottement des essieux dans leurs boîtes et en grande partie la résistance de l'air, et il a trouvé, en lançant ces essieux, plus ou moins chargés, sur des plans inclinés, que la résistance au pourtour des roues était à peu près 0,001 du poids total (445).

M. Wood a encore déterminé directement le frottement des essieux dans leurs boîtes en les faisant tourner après les avoir chargés. Il a reconnu que la charge de l'essieu ne devait pas dépasser $6^k,33$ par centimètre carré de sa surface de contact avec ses boîtes; au-dessus de cette limite, la graisse est chassée et les surfaces frottantes s'entament. Le graissage continu mis en usage permet de dépasser de beaucoup cette pression (441 et 442). Il a aussi reconnu que la boîte étant en très-bon état et la graisse bien préparée et bien distribuée, le frottement n'était que le $\frac{1}{60}$ de la charge, au lieu du $\frac{1}{8}$ qu'a donné Coulomb (63); dans la pratique on admet qu'il est $\frac{1}{20}$ (444).

**434.** *TABLEAU des résistances totales au mouvement, obtenues par* M. Lardener, *en lançant des wagons sur des plans diversement inclinés.* Ces résistances sont égales à $(P + p)$ sin $\alpha$, quand la vitesse des wagons est devenue uniforme (448 et 452).

| DÉSIGNATION DES VENTS. | PENTE. | RÉSISTANCE. | VITESSE uniforme en kilomètres par heure. |
|---|---|---|---|
| Calme parfait. . . . . | 1/250 | 1/250 $(P + p)$ | 30 |
| *Id.* . . . . . | 1/89 | 1/89 $(P + p)$ | 54 |
| Vent arrière . . . . . | 1/96 | 1/96 $(P + p)$ | 54 |
| *Id.* . . . . . | 1/265 | 1/265 $(P + p)$ | 30 |
| *Id.* . . . . . | 1/167 | 1/167 $(P + p)$ | 38 |
| Vent de bout. . . . . | 1/96 | 1/96 $(P + p)$ | 45 |
| Vent de côté. . . . . | 1/177 | 1/177 $(P + p)$ | 27 |

Le vent de côté est le plus défavorable. Il est à regretter que l'on n'ait pas constaté la vitesse du vent.

**435.** *Résistance totale que les convois opposent au mouvement.*

Dans ces derniers temps on a fait sur plusieurs chemins de fer français et anglais, avec le dynamomètre et des diagrammes relevés à l'aide de l'indicateur de Watt, des expériences dans le but de constater la résistance que les convois opposent au mouvement.

Des résultats obtenus, les auteurs du *Guide du Mécanicien* concluent que pour un convoi brut de 60 tonnes (26 pour la machine avec son tender et 34 pour les wagons), marchant à la vitesse de 45 kilomètres à l'heure, on peut diviser la résistance de la manière suivante.

| 1° *Résistance du convoi brut :* | | *Pour le convoi.* | *Par tonne.* |
|---|---|---|---|
| *Id.* | due au mouvement des véhicules. . . . . | 375$^k$ | 6$^k$,25 |
| *Id.* | due aux frottements du mécanisme sans charge. | 150 | 2 ,50 |
| *Id.* | due à l'augmentation des frottements du mécanisme produite par la pression de la vapeur. | 105 | 1, 75 |
| | Totaux. . . . . | 630 | 10, 50 |

| 2° *Résistance de la machine avec son tender :* | | *Pour 26 tonnes.* | *Par tonne.* |
|---|---|---|---|
| *Id.* | due au mouvement comme véhicules. . . . . | 162$^k$,50 | 6$^k$,25 |
| *Id.* | due aux frottements du mécanisme sans charge. | 149 ,50 | 5 ,75 |
| *Id.* | due à la pression de la vapeur. . . . . | 104 ,00 | 4 ,00 |
| | Totaux. . . . . | 416 ,00 | 16 ,00 |

Sauf l'erreur due aux approximations adoptées en passant des nombres 2,50 et 1,75 à ceux 5,75 et 4,00, en ajoutant à la résistance 416$^k$,00 du moteur, la résistance $6{,}25 \times 34 = 212^k{,}5$ des wagons, on trouve la première résistance totale 630$^k$,00 du convoi.

Des expériences faites avec le dynamomètre de M. Morin, par M. J. Poirée, sur le chemin de fer de Paris à Lyon, d'abord de Paris à Melun, puis de Melun à Paris, afin que la moyenne représentât le tirage sur niveau, il résulte que pour remorquer une machine mixte de la ligne de Lyon et son tender, chargés d'eau et de coke, il faut compter sur une traction de 11 kilog. par tonne, la vitesse étant de 45 à 50 kilomètres à l'heure.

M. Wyndham Harding, en discutant les différents résultats obtenus pour la résistance des convois sur un chemin horizontal, a posé la formule empirique suivante, qui peut, dans les cas ordinaires, servir de point de départ pour calculer les dimensions des machines locomotives (466). Elle donne des résultats un peu forts pour les faibles vitesses, mais très-convenables pour des vitesses de 60 à 100 kilom. à l'heure; les trains pèsant de 20 à 100 tonnes.

$$R = 2{,}72P + 0{,}094VP + 0.00484NV^2.$$

R résistance en kilogrammes ;
V vitesse du convoi en kilomètres par heure ;
N surface de front du train ou sa plus grande section, en mètres carrés ; en général, on peut faire $N = 5$ ;
P poids brut du convoi en tonnes ;

Le premier terme 2,72P est dû au coefficient du frottement des véhicules ;
Le second, qui est proportionnel à la vitesse, exprime la résistance qui est due

aux chocs et vibrations résultant du passage sur les joints des rails et aux mouvements irréguliers du train ;

Le troisième, qui est proportionnel au carré de la vitesse, est dû à la résistance de l'air (446).

Sur un chemin en pente, on ajouterait $1000Pi$ à la valeur de R, $i$ étant la pente par mètre mesuré sur le chemin même (448).

Cette formule s'applique à tout le convoi (machine, tender et wagons) aussi bien qu'aux wagons seuls ; mais alors elle ne tient pas compte de la résistance due aux frottements du mécanisme de la machine, et il faut pour avoir la résistance totale T augmenter R de 25 ou 20 pour 100, selon qu'il s'agit d'un convoi de voyageurs ou d'un convoi de marchandises.

En divisant par P la valeur de R ou celle de T, on aurait la résistance par tonne du poids brut.

456. *Résistance que les wagons à freins opposent au mouvement du convoi quand les freins sont serrés.* Des expériences faites au dynamomètre sur le chemin de Lyon, par M. Jules Poirée, il résulte :

1° Que pour des petites vitesses cette résistance peut varier de 0,11 à 0,25 du poids du wagon, selon que les rails sont humides ou secs ;

2° Que cette résistance diminue avec la vitesse : ce qui montre que le frottement des roues sur les rails doit diminuer, puisque évidemment la résistance de l'air augmente avec la vitesse (59 et 446). Dans les limites de poids et de vitesses usuelles, la diminution de résistance résultant de l'augmentation de la vitesse est à peu près indépendante du poids des wagons et de l'état des rails ; elle peut être représentée par $25v - 0{,}35v^2$ ; de sorte que l'on a

$$R = fP - 25v + 0{,}35v^2.$$

R résistance des wagons à freins, les freins étant serrés ;

P poids du wagon ;

$f$ coefficient de frottement que l'on peut faire égal à 0,13 pour les rails humides, et à 0,30 pour les rails très-secs. Dans le calcul de la charge que peut traîner une locomotive, on peut faire $f = 0{,}17$ (n° 464) ;

$v$ vitesse que la formule suppose comprise entre 5 et 22 mètres par seconde. Ces vitesses sont évidemment supérieures à celles qui ont servi de base à la loi du n° 59).

457. *Plans automoteurs.* Sur ces plans, pour obtenir la résistance due au frottement de la corde et à sa roideur, et au frottement des axes du tambour, des petites poulies et des rouleaux qui supportent la corde, on a fait descendre librement un wagon chargé qui en faisait remonter un même vide, et on a tiré cette résistance de la formule suivante, établie de la même manière que celle (*a*) n° 452 :

$$E = \frac{1}{2} g \frac{(P + p + c)\sin\alpha - (P + p)\sin\alpha - \frac{P + p + c + P + p}{240} - X}{P + p + c + P + p + \omega + 0{,}54(2p + p')} T^2.$$

Dans cette formule, tout est connu à l'exception de X.

X résistance cherchée;
E espace parcouru pendant le temps T qu'a duré l'expérience;
P poids du wagon descendant : on suppose qu'il est le même pour le wagon montant;
$p$ poids des roues de chaque wagon;
$p'$ poids des pièces qui tournent, autres que les roues de wagons;
$c$ charge du wagon descendant;
1/240 coefficient de la résistance à la traction des wagons sur le chemin de fer;
$\omega$ poids de la corde;
0,54 $(2p + p')$ poids des masses fictives, lesquelles appliquées à la circonférence des pièces qui tournent, roues, tambours, poulies et rouleaux, et ayant par conséquent la vitesse des wagons, auraient, par rapport aux axes de ces pièces, le même moment d'inertie que ces pièces elles-mêmes (452).

M. N. Wood, en opérant ainsi, a trouvé $X =$ de $\frac{1}{4}$ à $\frac{1}{3}$ $(p' + \omega)$, cette résistance étant appliquée sur les tourillons des petites poulies, et comme le diamètre de ces tourillons est le $\frac{1}{12}$ de celui des poulies, cette résistance appliquée au pourtour des poulies est de $\frac{1}{36}$ $(p' + \omega)$. D'autres expérimentateurs ont trouvé $\frac{1}{22}$ et $\frac{1}{24}$ de $(p' + \omega)$; mais les expériences ont été faites avec moins de soin; du reste, il serait très-convenable de reprendre ces expériences et de tenir compte de la résistance de l'air, qu'on a négligée.

**438.** *Charge que peut traîner un cheval sur un chemin de fer.* Supposant que la résistance à la traction des wagons remorqués par des chevaux est $\frac{1}{200}$ de la charge brute (chargement et wagons) (452), la charge brute traînée par un cheval est donnée par la formule

$$\frac{X}{200} = 70 \text{ kilog.}, \quad \text{d'où} \quad X = 14\,000 \text{ kilog.}$$

X charge brute traînée;
$70^k$ traction moyenne d'un cheval travaillant 10 heures par jour et parcourant 3240 mètres par heure (36).

Sur une rampe, la charge que peut traîner un cheval est donnée par la formule

$$\frac{X}{200} \pm X \sin \alpha \pm Q \sin \alpha = 70 \text{ kilog.}$$

$\alpha$ angle que fait le plan incliné avec l'horizon;
Q poids du cheval;
$X \sin \alpha$ et $Q \sin \alpha$, composantes, parallèles au plan incliné, de la charge traînée et du poids du cheval; elles sont positives ou négatives suivant qu'on monte ou qu'on descend (448).

**459.** *Machines fixes.* A l'origine des chemins de fer, on faisait usage de machines fixes pour remorquer les convois ; elles étaient espacées entre elles de 2000 mètres, et des cordes, auxquelles on fixait les convois, allaient de l'une à l'autre.

**460.** Tableau comparatif de la résistance sur différentes voies de communication :

| | |
|---|---|
| Routes ordinaires en bon état. . . . . | $\frac{1}{30} = 0{,}033$ |
| Routes en bois. . . . . | $\frac{1}{70} = 0{,}014$ |
| Chemins de fer, vitesse de 8 lieues à l'heure. . . . . | $\frac{1}{200} = 0{,}005$ |
| *id.* vitesse de 12 lieues à l'heure. . . . . | $\frac{1}{100} = 0{,}010$ |
| Canaux à grande section, bateaux ordinaires, très-faible vitesse. . | $\frac{1}{1000} = 0.001$ |
| *id.* *id.* vitesse double. . . . | $\frac{1}{250} = 0{,}004$ |
| *id.* *id.* vitesse quadruple. . | $\frac{1}{62} = 0{,}016$ |
| Canaux à petite section, bateaux ordinaires, faible vitesse. . . . | $\frac{1}{600} = 0{,}0017$ |
| *id.* *id.* vitesse double. . . . | $\frac{1}{150} = 0{,}0066$ |
| *id.* *id.* vitesse quadruple. . | $\frac{1}{37} = 0{,}0305$ |

Sur canaux, on a supposé la résistance proportionnelle au carré de la vitesse.

### MACHINES LOCOMOTIVES.

**461.** *Classification des machines locomotives.* D'après la nature de leur service, les locomotives se divisent :

1° En *machines à voyageurs*, affectées exclusivement au transport des voyageurs, et marchant avec une vitesse d'au moins 40 à 50 kilomètres à l'heure, en remorquant 14 ou 15 voitures sur un chemin à rampes de $0^m,005$ par mètre. Sur certains chemins, des machines spéciales marchent, dans les circonstances régulières du service, à une vitesse de 80 à 100 kilomètres, en remorquant 7 ou 8 voitures. Les roues motrices sont indépendantes des autres roues, et leur diamètre, qui varie de $1^m,68$ à $2^m,10$, et même $2^m,20$ à $2^m,35$ et au delà pour les machines Crampton, se proportionne à la vitesse de translation que l'on veut

obtenir. La course des pistons est faible relativement au diamètre des roues.

2° En *machines à marchandises*, qui sont disposées pour remorquer de très-fortes charges à des vitesses comprises entre 20 et 30 kilom. à l'heure. Les roues motrices ont de $1^m,20$ à $1^m,50$, selon la vitesse, et elles sont accouplées avec une ou deux autres paires de roues de même diamètre. La course des pistons est grande. Ces machines remorquent 40 wagons.

3° En *machines mixtes*, lesquelles, faisant à la fois le service des deux espèces précédentes, marchent à des vitesses de 35 à 40 kilom., et accidentellement 50 kilom. Leurs roues motrices ont de $1^m,50$ à $1^m,60$ de diamètre, et elles sont accouplées avec une autre paire de roues. Ces machines remorquent, sur un chemin à rampes de $0^m,005$ par mètre, 20 voitures, tant à voyageurs qu'à marchandises. Lorsque la pente dépasse $0^m,005$, on est obligé d'avoir recours à ces locomotives pour le service des voyageurs, à cause de la plus grande adhérence sur les rails que donnent les roues accouplées.

4° On construit encore des *machines-tender* qui portent elles-mêmes leur eau et leur coke. Elles conviennent pour les petits trajets. Si elles sont appliquées au service des voyageurs dans la banlieue d'une grande ville, les roues motrices sont indépendantes ; celles du chemin d'Auteuil sont à 4 roues accouplées; quand elles sont utilisées à former les trains dans les gares, ou comme machine de renfort sur une rampe, les 6 roues sont accouplées et d'un petit diamètre, et on augmente la course des pistons. En Angleterre, sur quelques embranchements, on a construit des voitures à voyageurs qui portent leur machine et qui marchent isolément.

*Les locomotives se divisent aussi en machines à cylindres intérieurs et à machines à cylindres extérieurs.* Les premières ayant les cylindres placés entre deux roues d'un même essieu, et par suite entre les rails de la voie, elles offrent plus de stabilité et un mouvement plus régulier que les machines à cylindres extérieurs; mais leur essieu moteur, qui est deux fois coudé, présente plus de difficulté de fabrication et de chances de rupture qu'un essieu droit. Les secondes machines ayant leurs cylindres placés en dehors du bâti et en surplomb à l'extérieur de la voie, la construction est simplifiée, l'essieu coudé est supprimé, et les principales pièces motrices sont bien en vue du mécanicien ; mais quoique, par cette disposition, le centre de gravité de la machine puisse être placé à $0^m,12$ ou $0^m,15$ plus bas, s'il n'était possible d'appliquer un correctif simple à l'instabilité, sous ce rapport, l'avantage serait en faveur des machines à cylindres intérieurs.

M. Stephenson a construit une machine à trois cylindres, un intérieur, et deux extérieurs dont le travail total est équivalent à celui du premier.

M. Verpilleux, pour la remonte des wagons de houille sur le chemin de Saint-Étienne, a imaginé de placer deux cylindres supplémentaires sur le tender pour utiliser l'adhérence de ce véhicule sur les rails.

*On peut encore classer les locomotives d'après le nombre des roues.* Les premières locomotives étaient à 4 roues, comprises entre la boîte à feu et la boîte à fumée. La distance des essieux était de 2 mètres, ce qui permettait aux machines de circuler sur des courbes à petit rayon. On a attribué au peu de stabilité de ces machines différents accidents, qui les ont fait abandonner pour employer uniquement les machines à 6 roues, qui donnaient la grande puissance qui était réclamée, sans fatiguer davantage les rails ; aujourd'hui les locomotives à 4 roues ne sont guère en usage que pour des terrassements.

En Amérique, on a établi des machines à 8 roues.

Enfin, dans le système Engerth, qui a pris naissance pour le chemin du Sommering, dont la pente est considérable, il y a 10 ou 12 roues.

Dans la machine du Sommering, le tender est réuni invariablement à la machine par le même châssis. La machine porte sur un train de 6 roues accouplées placées sous la chaudière, et le tender sur un train de 4 roues accouplées, dont les deux de devant se trouvent en avant du tender, qui s'étend jusque sous la chaudière. Ses deux trains sont indépendants l'un de l'autre dans le sens horizontal, afin qu'ils puissent suivre des courbes de petits rayons; mais ils se commandent par une roue dentée fixée au train de la machine, et qui engrène avec d'autres roues dentées montées sur l'essieu d'arrière du train de la machine et sur celui d'avant du train du tender. Les cylindres sont extérieurs, et ils commandent l'essieu d'arrière du train de la machine.

Sur le chemin du Midi, il y a des machines Engerth qui pèsent 52 tonnes, et qui peuvent remorquer des charges de 500 tonnes. Des machines de ce système sont également en construction pour les autres grandes lignes françaises. Pour les machines Engerth des chemins de l'Est et du Nord, le train du tender sera à 6 roues comme celui de la machine ; l'essieu d'avant du tender est seul commandé par la roue d'engrenage intermédiaire ; afin d'augmenter la vitesse, les 8 roues motrices ont $1^m,28$ de diamètre, au lieu de $1^m,16$ qu'ont celles du Sommering; les 4 autres roues ont un diamètre plus petit.

On construit aussi des machines mixtes de ce système pour le chemin du Nord Elles seront à 8 roues, dont 4 motrices et de $1^m,74$ de diamètre ; les roues du tender ont le diamètre ordinaire des roues de tenders, et ne sont pas accouplées. Le poids total de la machine sera de 38 tonnes, dont 11 tonnes sur chacun des essieux moteurs. Les cylindres sont intérieurs avec un essieu coudé en acier fondu.

*Enfin on peut encore classer les locomotives d'après la position des roues.* Le besoin d'une grande puissance de vaporisation ayant fait abandonner les machines à 4 roues, on plaça un essieu à l'arrière du

foyer, en laissant les roues motrices au milieu. En augmentant ainsi le nombre des points d'appui, on put augmenter les dimensions de la chaudière, y placer 111 tubes au lieu de 82, et porter la surface de chauffe de $22^{m.q.},5$ à $52^{m.q.}$. En 1842, tout en conservant le même écartement des essieux extrêmes, on remit le foyer en porte-à-faux ; alors la longueur des tubes devint $3^{m},80$, et la surface de chauffe totale $66^{m.q.}$ ; puis cette surface arrive successivement à $70^{m.q.}$, et même $95^{m.q.}$ lorsque les plaques tournantes le permettent. En 1842, M. Crampton, en portant l'essieu moteur à l'arrière du foyer et en espaçant les essieux extrêmes de $4^{m},86$, a pu donner un très-grand diamètre aux roues motrices, augmenter dans une proportion considérable la surface de chauffe directe dans le foyer, porter à 178 le nombre des tubes, et obtenir $102^{m.q.}$ de surface de chauffe. Les essieux moteurs des machines Crampton étant peu chargés, ces machines ne peuvent remorquer que de faibles charges ; mais leurs grandes roues motrices et leur puissance extraordinaire de vaporisation les rendent très-convenables pour marcher à grande vitesse. Les cylindres sont fixés à l'extérieur, contre la chaudière. Dans les machines Engerth, le nombre des tubes atteint 235 et leur longueur 5 mètres.

**462.** *Pression de la vapeur dans la chaudière, dans les cylindres et derrière les pistons.* Dans les anciennes machines, la pression absolue de la vapeur dans la chaudière était généralement de 4,5 atmosphères ; mais dans les nouvelles, on l'a portée successivement à 5, 6, 7 et 8 atmosphères, et quelques ingénieurs anglais paraissent même disposés à aller au delà.

MM. Gouin et Le Chatelier ont reconnu, en 1844, à l'aide d'une machine à détente fixe, qu'à la vitesse de 45 kilom. à l'heure, l'ouverture du régulateur ayant varié de $15^{c.q.}$ à $91^{c.q.}$, la pression dans la boîte des tiroirs a varié de 0,64 à 0,96 de celle de la chaudière ; ils ont reconnu aussi que la tension dans la boîte des tiroirs ne croissait plus sensiblement en donnant au régulateur une ouverture supérieure à $55^{c.q.}$ ; ils ont en outre constaté que la perte de tension que subissait la vapeur en passant par les lumières du tiroir et les conduits aboutissant au cylyndre était de 9 à 10 pour 100 ; de sorte que le régulateur étant complétement ouvert, la tension est à peu près de 15 pour 100 moins élevée dans les cylindres que dans les chaudières. Pour une machine placée dans de bonnes conditions, il y a lieu de prendre 10 pour 100 pour cette différence.

La plus faible pression observée lorsque le régulateur était à peine ouvert, s'est élevée à 0,36 de la pression dans la chaudière.

Quelques expériences spéciales ont permis de constater que le régulateur étant ouvert à la section moyenne de $50^{c.q.}$, et le niveau de l'eau dans la chaudière étant très-élevé, sans qu'il y eût cependant projection d'eau dans la cheminée, la tension dans le cylindre s'abaissait à

0,75 de celle de la chaudière, et que quand la machine primait abondamment, elle s'abaissait à 0,62.

Pour les anciennes machines vaporisant $1^{m.c.},7$ d'eau par heure, la tuyère qui injectait dans la cheminée la vapeur sortant du cylindre avait $0^{m},05715$ de diamètre, ce qui fait 25,64 centimètres carrés de section (469); pour une autre puissance de vaporisation, cette section varierait dans le même rapport. Avec ces proportions, il résulte des expériences, déjà bien reculées, de M. de Pambour, que la pression derrière le piston, en kilogrammes sur un centimètre carré, est représentée par

$$0{,}007\,662v \qquad \text{(465, p. 602)}$$

$v$ vitesse de la machine en kilomètres par heure.

Cette pression est la force élastique absolue de la vapeur diminuée d'une atmosphère.

Une machine à marchandises, système Polonceau (469), détente par coulisse Stephenson à $0^{m},23$ de la course du piston, a donné à M. Bertera, pour une vitesse de 25,2 kilom., les résultats suivants, qui sont exprimés en kilogrammes par centimètre carré:

| | |
|---|---|
| Pression absolue dans la chaudière. . . . . | $5^{k},98$ |
| *Id.* dans la boîte des tiroirs. . . . . | 5 ,23 |
| *Id.* dans le cylindre pendant l'admission. . . . . | 3 ,37 |
| *Id.* moyenne sur le piston. . . . . | 2 ,36 |
| Pression moyenne derrière le piston. . . . . | 1 ,59 |
| Pression effective moyenne sur le piston. . . . . | 0 ,77 |

D'après quelques essais de MM. Gouin et Le Chatelier, la pression effective de la vapeur derrière le piston étant de $0^{m},76$ de mercure, dans la boîte du tiroir elle n'était plus que de $0^{m},15$, et de $0^{m},07$ à $0^{m},08$ à l'orifice de la tuyère.

463. *Avance et recouvrement. Détente.* Pour que la vapeur qui remplit le cylindre commence à s'échapper, et que la vapeur soit admise sur la face opposée du piston, un peu avant que ce piston arrive à la fin de sa course, on donne une certaine avance au tiroir en calant convenablement l'excentrique, et comme l'avance à l'admission doit être très-faible et celle à l'échappement considérable, on réduit la première en élargissant intérieurement les bords du tiroir, c'est-à-dire en leur donnant un certain recouvrement sur les lumières.

L'avance du tiroir fait agir la vapeur par détente pendant une portion de la course du piston, portion que l'on augmente en donnant du recouvrement extérieur au tiroir.

Les éléments de la distribution des machines à voyageurs du chemin de fer du Nord sont les suivants :

| | |
|---|---|
| Course du piston | $0^m,560$ |
| Course du tiroir | 0 ,110 |
| Écartement des bords extérieurs des lumières d'admission | 0 ,196 |
| *Id.* intérieurs *id.* | 0 ,116 |
| Avance angulaire | 30° |
| Recouvrement extérieur de chaque côté | $0^m,024$ |
| *Id.* intérieur *id.* | 0 ,001 |
| Avance linéaire à l'admission | 0 ,005 |
| *Id.* à l'échappement | 0 ,028 |

Ces proportions fournissent les résultats suivants :

L'introduction de la vapeur commence un instant avant que le piston soit arrivé l'extrémité de la course pour reprendre son mouvement rétrograde.

La vapeur est introduite sur une portion de la course du piston, à partir de son origine, égale à $0^m,438$, et la détente a lieu sur le reste $0^m,122$ de la course.

L'échappement commence lorsque le piston a encore à parcourir $0^m,034$.

L'échappement est fermé et la vapeur se comprime derrière le piston sur une longueur de $0^m,042$.

La détente produite par avance et recouvrement est la *détente fixe* des machines locomotives ; elle est aux 4/5 environ dans l'exemple précédent (356) ; on la pousse généralement aux 2/3, et quelquefois au 1/2 ; mais alors on rend le démarrage plus difficile.

On a cherché à appliquer la détente variable aux locomotives, afin que, pendant la marche, le mécanicien puisse augmenter ou diminuer la puissance de sa machine selon les circonstances ; mais jusqu'à présent aucun des systèmes essayés, qui sont formés de deux ou trois tiroirs superposés, n'est devenu d'un usage général, à cause des sujétions occasionnées par la grande complication.

La *coulisse de Stephenson* permet d'obtenir, avec la distribution ordinaire à deux excentriques et à un seul tiroir, une détente variable qui, quoique imparfaite, n'en est pas moins devenue d'un usage très-général, à cause de sa simplicité et de l'amélioration qui en est résultée dans le mécanisme destiné à opérer le changement de marche. Avec cette coulisse, qui est en arc de cercle, on peut faire varier la détente depuis 6/7 jusqu'à 1/3 et même 1/5.

**464.** *Adhérence des roues motrices sur les rails.* Pour qu'une machine locomotive puisse remorquer un convoi, il faut non-seulement que sa force soit suffisante pour traîner ce convoi, mais aussi qu'il y ait, au minimum, sans atteindre cette limite, équilibre dynamique entre l'adhérence au pourtour des roues motrices et la force moyenne transmise par les pistons tangentiellement aux manivelles, non compris la portion de cette force absorbée par le service des pompes et les différentes résistances passives de la locomotive, sans quoi les roues motrices tourneraient sur place. On doit donc avoir (49)

$$R\pi D > F\pi d ;$$

R adhérence ou frottement de glissement des roues motrices sur les rails; R = 0,30 P sur des rails très-secs, R = 0,13 P pour les rails humides, et, dans la pratique, il convient de supposer R = 0,17 P (n° 456);

P pression des roues motrices sur les rails; dans la pratique il convient que P ne dépasse pas 10 000 kil. pour deux roues motrices; mais dans les puissantes machines nouvelles on va à 12 000 kil. Sur le chemin du Nord, tout se dispose pour ne pas dépasser 11 000 kil.

D diamètre des roues motrices (469);

$d$ diamètre des manivelles ou course des pistons (469);

F pression moyenne transmise par les deux pistons tangentiellement aux manivelles (89).

465. *Théorie des machines locomotives.* Cette théorie est un extrait de celle plus complète donnée par M. de Pambour dans son *Traité des machines locomotives*, publié en 1840. Depuis le travail de M. de Pambour, les locomotives ayant changé dans leurs dispositions et proportions, et surtout dans la distribution de la vapeur par les tiroirs, il y aurait lieu de faire de nouvelles expériences pour assigner aux coefficients les valeurs qui leur conviennent aujourd'hui. La théorie des locomotives revient à la solution du problème suivant et de sa réciproque : *Étant données les dimensions d'une machine locomotive, trouver la charge qu'elle peut traîner avec une certaine vitesse ;* réciproquement, *étant données la charge à traîner et la vitesse, trouver les dimensions de la machine.*

1° *Proposition directe.* Pour qu'il y ait équilibre dans une machine locomotive, on doit avoir, en rapportant la puissance et les résistances à un mètre carré de surface de piston,

$$R = R' + F' + p + p'v. \qquad (1)$$

R pression de la vapeur sur un mètre carré de surface de piston;

R′ résistance qu'oppose le convoi au mouvement des pistons;

F′ résistance que les frottements de la locomotive opposent au mouvement des pistons;

$p$ résistance due à la pression atmosphérique; elle est de 10 333 kilog. par mètre carré (355);

$p'v$ résistance due à la vitesse avec laquelle la vapeur s'échappe dans la cheminée.

Si l'on voulait rapporter la puissance et les différentes résistances aux surfaces des deux pistons, il suffirait de multiplier R, R′, F′, $p$ et $p'v$ par $\frac{1}{2}\pi d^2$, $d$ étant le diamètre des pistons en mètres.

Il s'agit alors de déterminer les valeurs de R′, F′, $p$ et $p'v$.

La résistance totale que le convoi oppose au mouvement des pistons est $\frac{R'\pi d^2}{2}$, et, en appelant R″ la force nécessaire pour tirer directement le convoi, pour qu'il y ait équilibre dynamique entre R′ et R″, on doit avoir

$$\frac{R'\pi d^2}{2} \times 2l = R''\pi D, \quad \text{d'où} \quad R' = R'' \frac{D}{d^2 l}; \qquad (28 \text{ et } 49)$$

$l$ course des pistons ;
D diamètre des roues motrices.

Sur un chemin de fer, on a

$$R'' = KM + Km + uv^2 \pm (M + m) \sin \alpha ;$$

$K = \frac{1}{250}$, coefficient de la résistance que le frottement des wagons oppose au mouvement (452) ;
M poids du convoi et du tender (441) ;
$KM = fP \frac{d}{D} + f'(P + p)$ (nos 444 et 445) ;
$m$ poids de la locomotive (469) ;
$v$ vitesse du convoi en kilomètres par heure ;
$uv^2 = 0{,}13AV^2$ résistance que l'air oppose au mouvement du convoi (446) ;
$\alpha$ angle que fait le chemin avec l'horizon ;
$(M + m) \sin \alpha$ composante du poids total, parallèle au chemin ; elle est nulle sur un chemin de niveau, et sur un chemin en pente elle est positive ou négative suivant que le convoi monte ou descend (448).

Remplaçant R'' par sa valeur dans celle de R', on a

$$R' = [KM + Km + uv^2 \pm (M + m) \sin \alpha] \frac{D}{d^2 l}. \qquad (2)$$

La résistance F' des différentes pièces de la locomotive sur les pistons est due à la résistance directe F de ces pièces quand la machine marche à vide, plus à une résistance directe $\delta$ qui est proportionnelle à l'effort de traction (455 et 466). En rapportant ces deux résistances au mouvement direct du convoi, on a donc, pour l'équilibre dynamique,

$$F'\pi d^2 l = F\pi D + \delta [KM + uv^2 \pm (M + m) \sin \alpha] \pi D ;$$

d'où l'on tire

$$F' = F \frac{D}{d^2 l} + \delta [KM + uv^2 \pm (M + m) \sin \alpha] \frac{D}{d^2 l} \qquad (3)$$

$\delta = 0{,}14$ pour les locomotives à roues libres ;
$\delta = 0{,}22$ pour les locomotives à roues couplées.

La valeur de $p'v$ est connue quand, pour une grandeur déterminée de $v$, on a $p'$. D'après les expériences de M. de Pambour, $p'$ est donné par la formule

$$p' = \beta \frac{S'}{O}.$$

$\beta$ coefficient égal à 0,11557 ;
S' quantité d'eau vaporisée en mètres cubes par heure ; cette valeur de S' suppose

qu'il n'y a pas de fuites de vapeur; dans le cas contraire, on diminuerait S' pour en tenir compte;

O section de la tuyère en centimètres carrés.

Dans l'exemple cité n° 462, on a $\frac{S'}{O} = \frac{1,7}{25,64} = 0,0663$; d'où l'on conclut

$$p' = 0,11557 \times 0,0663 = 0,007662.$$

La pression sur un centimètre carré du piston est donc $0,007662v$ kil., et pour un mètre carré, on a $p'v = 76,62v$ kilog.; cette valeur de $p'v$ suppose $v$ exprimé en kilomètres par heure.

Substituant les valeurs de R' et de F', (2) et (3), ainsi que celle de $p'$ dans la valeur de R (1), on a, en remarquant que K$m$ est compris dans la valeur de F,

$$R = [KM + uv^2 \pm (M+m)\sin\alpha]\frac{D}{d^2l} + F\frac{D}{d^2l} + \delta[KM + uv^2 \pm (M+m)\sin\alpha]\frac{D}{d^2l} + p + 76,62v.$$

ou

$$R = (1+\delta)[(K \pm \sin\alpha)M \pm m\sin\alpha + uv^2]\frac{D}{d^2l} + F\frac{D}{d^2l} + p + 76,62v. \quad (4)$$

On a

$$s = \mu S.$$

$s$ volume de vapeur à la pression R dépensé par heure dans le cylindre;

S volume de l'eau qui a produit le volume $s$ de vapeur;

$\mu$ rapport de $s$ à S (272).

On peut poser

$$\mu = \frac{1}{n + qR}.$$

$n$ et $q$ quantités constantes égales respectivement à 0,000 1421 et 0,000 000 0471 quand R est exprimé en kilogrammes sur un centimètre carré.

Remplaçant dans cette équation R par sa valeur (4), on a

$$\mu = \frac{1}{n + q\left\{(1+\delta)[(K \pm \sin\alpha)M \pm m\sin\alpha + uv^2]\frac{D}{d^2l} + F\frac{D}{d^2l} + p + 76,62v\right\}}. \quad (5)$$

La dépense de vapeur pour chaque coup de piston est

$$\frac{1}{4}\pi d^2(l + c).$$

$c = 0,05l$ liberté du cylindre ou espace perdu entre les fonds du cylindre et les faces du piston, y compris les passages de vapeur entre les tiroirs et le cylindre.

Le nombre des coups donnés par les 2 pistons et celui des tours faits par chaque roue motrice en une heure sont alors

$$\frac{\mu S}{\frac{1}{4}\pi d^2(l+c)} \quad \text{et} \quad \frac{\mu S}{\pi d^2(l+c)}.$$

Le chemin parcouru aussi en une heure, c'est-à-dire la vitesse de la locomotive en mètres par heure, est donc

$$V = \frac{\mu S \pi D}{\pi d^2(l+c)} = \frac{\mu S D}{d^2(l+c)};$$

et en kilomètres cette vitesse est

$$v = \frac{V}{1000} = \frac{1}{1000} \times \frac{\mu S D}{d^2(l+c)}.$$

Remplaçant $\mu$ par sa valeur (5), on a

$$V = \frac{1}{1000} \times \frac{1}{q} \times \frac{l}{l+c} \times \frac{S}{(1+\delta)[(K \pm \sin\alpha)M \pm m\sin\alpha + uv^2] + F + \frac{d^2 l}{D}\left(\frac{n}{q} + p + 76{,}62v\right)}. \quad (6)$$

S étant le volume de l'eau employée pour former le volume $s$ de vapeur, et S′ celui de l'eau qui sort de la chaudière (vapeur formée et eau qu'elle entraîne), on a, dans une locomotive,

$$S = 0{,}75S' \quad \text{ou} \quad S' = 1{,}33S.$$

En ayant égard aux pertes de vapeur par les soupapes de sûreté,

$$S' = 1{,}40\,S.$$

Dans une locomotive, la quantité d'eau évaporée croît proportionnellement à la racine quatrième de la vitesse de la locomotive; ainsi, $v$ étant la vitesse correspondant à la quantité d'eau évaporée S′, et $v''$ celle correspondant à la quantité S″, on a

$$\frac{S'}{S''} = \frac{\sqrt[4]{v}}{\sqrt[4]{v''}}, \quad \text{d'où} \quad S' = S''\sqrt[4]{\frac{v}{v''}} \qquad (\textit{Int.}, 267 \text{ et } 382).$$

Comme, à la vitesse $v'' = 32$ kilomètres à l'heure, on a trouvé que la quantité d'eau évaporée par heure était de $0^{mc},054$, c'est-à-dire de 54 litres, par mètre carré de la surface de chauffe totale T, on a

$$S'' = 0^{m},054 \times T.$$

Par suite, il vient

$$S' = 0{,}054 \times T\sqrt[4]{\frac{v}{32}} \quad \text{et} \quad S = \frac{0{,}054 \times T\sqrt[4]{\frac{v}{32}}}{1{,}40}.$$

Remplaçant S par sa valeur dans la formule (6), on a

$$v=\frac{1}{1000}\times\frac{1}{q}\times\frac{l}{l+c}\times\frac{\dfrac{0{,}054\times \mathrm{T}\sqrt[4]{\dfrac{v}{32}}}{1{,}40}}{(1+\delta)[(\mathrm{K}\pm\sin\alpha)\mathrm{M}\pm m\sin\alpha+uv^2]+\mathrm{F}+\dfrac{d^2l}{\mathrm{D}}\left(\dfrac{n}{q}+p+76{,}62v\right)}$$

Équation de laquelle on peut tirer directement la valeur de $v$; mais il vaut mieux, pour la facilité des calculs, déterminer cette valeur par tâtonnement : on substitue à $v$, dans le second membre de l'équation, une valeur que l'on suppose approcher de la valeur réelle, et on tire de l'équation une seconde valeur de $v$, plus ou moins exacte, mais s'approchant plus de la vérité que la valeur supposée; cette seconde valeur, substituée à son tour dans le second membre de l'équation, en donne une troisième plus exacte que la seconde; opérant sur cette troisième valeur comme sur les précédentes, on en obtient une quatrième plus exacte encore que la troisième, et en continuant ainsi de suite, on peut obtenir une valeur aussi approchée qu'on le veut de celle satisfaisant à l'équation précédente. Dans la pratique, on peut considérer comme suffisamment exacte la troisième ou la quatrième valeur.

2° *Réciproquement, soit à déterminer la charge traînée par la locomotive.* Il suffit de tirer la valeur de M de l'équation (6), ce qui donne

$$\mathrm{M}=\frac{1}{(1+\delta)(\mathrm{K}\pm\sin\alpha)}\left[\frac{1}{1000}\times\frac{l}{l+c}\times\frac{\mathrm{S}}{qv}-\frac{d^2l}{\mathrm{D}}\left(\frac{n}{q}+p+76{,}62v\right)-\mathrm{F}\right]-\frac{1}{\mathrm{K}\pm\sin\alpha}(uv^2\pm m\sin\alpha).$$

*Puissance des locomotives.* Une puissante locomotive fonctionnant dans les conditions habituelles des machines fixes ne serait que de la force de 25 à 30 chevaux; mais en calculant sa puissance d'après la résistance totale du convoi et l'espace parcouru dans une seconde, on arrive à une force de 200 à 300 chevaux; et si l'on ne tient compte que de la traction sur les wagons, on arrive à une force de 110 à 170 chevaux.

**466.** *Règle de M. Le Chatelier pour déterminer les dimensions des machines locomotives* (chemins de fer d'Angleterre en 1851).

M. Le Chatelier a calculé, par la marche simple suivante, trois locomotives, une à grande vitesse, système Crampton, une mixte et une à marchandises; les résultats qu'il a obtenus s'accordent d'une manière très-satisfaisante avec les dimensions de machines donnant un très-bon service sur nos chemins de fer.

1° La machine devant parcourir, par exemple, 80 kilomètres à l'heure ou $22^{m},22$ par seconde, comme il convient que le nombre de tours des roues motrices soit compris entre 2,5 et 3 pour toutes les locomotives,

pour 2,5 tours on aura pour le diamètre D de ces roues $D = \frac{22,22}{\pi \times 2,5} = 2^m,83$, et pour 3 tours $D = 2^m,36$; il est convenable de faire $D = 2^m,50$.

2° La pression étant 7 atmosphères dans la chaudière, la pression moyenne utile dans le cylindre est 4,5 atm. pour l'admission au premier cran de la détente, en déduisant la pression atmosphérique, plus 1,5 atm. pour la contre-pression, la détente, la compression et le passage de la vapeur de la chaudière aux cylindres, soit $p = 4^k,64$ par centimètre carré pour la pression utile 4,5 atmosphères.

3° La résistance T du convoi se calcule avec la formule de M. Harding (455).

4° Pour un tour des roues motrices, le travail produit par la vapeur devant être égal à celui absorbé par la résistance du convoi, on a

$$T \times \pi D = p \times \frac{4\pi d^2 l}{4}, \quad \text{d'où} \quad T = p\frac{d^2 l}{D}.$$

T résistance totale du convoi en kilog.;
D diamètre des roues motrices en centimètres;
$p$ pression moyenne utile de la vapeur dans les cylindres, en kilogrammes, sur un centimètre carré; elle est égale à $4^k,64$ dans l'hypothèse du 2° (462);
$d$ diamètre des pistons, en centimètres;
$l$ course des pistons, en centimètres.

Pour $T = 1920^k,64$, ce que donne la machine du 1er exemple suivant, en supposant $d = 42$, la formule précédente donne $l = 58,6$, soit 58 en nombre rond.

5° Faisant le coefficient d'adhérence des roues motrices sur les rails égal à 1/6 (464), pour $R = 1920$ kil., la charge des roues augmentée du poids de ces roues devient 11520 kil, soit 11,5 tonnes. Il conviendrait de limiter cette charge à 10 tonnes; cependant l'excédant $1^t,5$ ne doit pas faire compliquer la machine en accouplant deux paires de roues (464).

6° L'examen des machines fonctionnant bien ayant montré que l'on avait, S, S', S'' exprimant en mètres carrés les surfaces de chauffe totale, par le foyer et par les tubes, et $d$, $l$ le diamètre et la course des pistons en décimètres,

$$\frac{S}{d^2 l} = 1 \quad \text{et} \quad \frac{S'}{S''} = \frac{1}{10}.$$

Comme $d^2 l = 103,48$,

on a donc

| | | |
|---|---|---|
| $S$ | $= 103^{m.q.},48$ | soit $104^{m.q.},50$ |
| $S'$ | $= 9,41$ | $9,50$ |
| $S''$ | $= 94,07$ | $95,00$ |

Les règles précédentes fournissent les résultats du tableau suivant pour :

1° Un train *express* de huit wagons, pesant chacun 7,5 tonnes, marchant habituellement à la vitesse de 80 kilomètres à l'heure, sur des rampes de $0^m,005$ par mètre. Le poids de la machine est 25 tonnes, et celui du tender chargé 12 tonnes.

2° Un train omnibus, marchant avec 16 wagons de 7,5 tonnes, à une vitesse qui n'excède pas 45 kilomètres à la montée des rampes de $0^m,005$, et 55 kilom. sur niveau ou à la descente. Le poids de la machine est 24 tonnes et celui du tender 11. Il y a deux paires de roues accouplées.

3° Un train de marchandises marchant, avec 40 wagons pesant 9 tonnes chacun, à une vitesse de 30 kilom. à l'heure à la montée des rampes de $0^m,005$, et à la vitesse de 40 kilom. à la descence. Le poids de la machine est de 28 tonnes et celui du tender 12. Les trois paires de roues sont couplées.

| DÉTAILS. | MACHINE | | |
|---|---|---|---|
| | à voyageurs. | mixte. | à marchandises. |
| Poids total du convoi. . . . . | $97^t$ | $155^t$ | $400^t$ |
| Résistance due au mouvement des véhicules. . . { par tonne. | $11^k.84$ | $8^k.27$ | $5^k.60$ |
| Résistance due au mouvement des véhicules. . . { totale. . . | 1148 .48 | 1281 .85 | 2240 .00 |
| Résistance additionn. due au mécan. . | 287 .16 | 320 .46 | 448 .00 |
| Résistance due à la gravité.. . . . . | 485 .00 | 775 .00 | 2000 .00 |
| Résistance totale T.. . . . . | 1920 .64 | 2377 .31 | 4688 .00 |
| Diamètre des roues motrices.. . . . . | $2^m.50$ | $1^m.78$ | $1^m.30$ |
| Charge sur les roues motrices. . . . | $11^t.50$ | 14 .86 | $28^t.13$ |
| Diamètre des cylindres.. . . . . | $0^m.42$ | $0^m.40$ | $0^m.46$ |
| Course des pistons. . . . . | 0 .58 | 0 .57 | 0 .62 |
| Surface de chauffe du foyer.. . . . . | 9 .50 | 8 .29 | 11 .94 |
| *Id.* des tubes. . . . . | 95 .00 | 82 .91 | 119 .40 |
| *Id.* totale. . . . . | 104 .50 | 91 .20 | 131 .34 |

**467.** *Quantités d'eau, de vapeur et de coke consommées dans une locomotive* (469 et 473). D'après M. de Pambour, $s'$ étant le poids de l'eau évaporée, y compris l'eau entraînée par la vapeur, et $s$ étant le poids de la vapeur, non compris les pertes par les soupapes, on a $s = 0{,}75s'$.

Des observations et des expériences récentes font une plus large part à l'eau entraînée. Ainsi, dans les locomotives, la consommation d'eau étant de 9 à 10 kilog. par kilog. de coke consommé, comme dans les machines fixes, où l'eau entraînée est négligeable, 1 kil. de coke de très-bonne qualité ne produit que $6^k,5$ de vapeur (308); il en résulte que pour les locomotives la quantité d'eau entraînée ou condensée dans les cylindres est environ de 30 à 40 pour cent. L'expérience directe fournit encore une proportion plus considérable; ainsi des expériences faites sur le chemin d'Orléans par M. Bertera ont donné, pour les machines à voyageurs et par kilomètre parcouru, $5^k,02$ de coke brûlé, et

46k,10 d'eau dépensée, dont 42 pour 100 a été entraînée ou condensée; pour les machines à marchandises, ces nombres ont été respectivement 6,96, 71,17 et 52.

Le coke employé au chauffage des locomotives, pour être de bonne qualité, ne doit pas laisser plus de 6 pour 100 de résidu (cendre et schiste); il est de médiocre qualité s'il en laisse 9, et de mauvaise s'il en laisse 12 (n° 290).

*Comparaison entre la consommation de houille dans les locomotives à grilles à gradins du système Chobrzinski, et celle de coke dans les locomotives à grilles ordinaires sur le chemin de fer du Nord.* Les grilles inclinées permettent l'emploi de houilles très-maigres et sèches, que l'on rejette en général pour l'usage des chaudières.

| | |
|---|---|
| 7 machines Crampton, à grilles nouvelles, ont parcouru 33 193 kilom., pour une consommation de 251 900 kilog. de houille, coûtant 27 fr. la tonne, rendue à la frontière, soit par kilom. | 7k. 6 |
| 14 autres machines Crampton, à grilles anciennes, ont parcouru 57 616 kilom., pour une consommation de 493 750 kil. de coke, coûtant 33 fr. la tonne rendue à la frontière, soit par kilomètre. | 8 .6 |
| 1 petite machine à voyageurs a brûlé en houille. | 7 .6 |
| 9 machines semblables ont consommé en coke. | 8 .4 |
| 4 machines à marchandises à petit foyer ont brûlé en houille et briquettes. | 8 .8 |
| 6 autres machines semblables, en coke. | 10 .1 |
| 45 grosses machines à marchandises, en houille et briquettes. | 13 .6 |
| 32 de ces mêmes machines consommaient en coke. | 15 .9 |
| Sur le chemin d'Orléans. | |
| 1 machine trains express, en houille. | 5k .25 |
| Les autres machines semblables, en coke. | 6 .1 |
| 3 machines à marchandises du dépôt d'Ivry, en houille. | 10 .6 |
| Les autres machines du même système, en coke. | 11 .6 |
| 4 machines à marchandises du dépôt de Bordeaux, en houille de choix. | 9 .5 |
| Les autres machines du même dépôt, en coke de mauvaise qualité. | 11 .5 |
| 9 machines du dépôt d'Orléans, houilles diverses. | 11 .3 |
| Les autres machines du même dépôt, en coke. | 11 .7 |
| 4 machines du dépôt de Tours, en houilles diverses. | 10 .6 |
| Les autres machines du même dépôt, en coke. | 10 .1 |

468. *Stabilité des machines locomotives.* Si une machine locomotive n'était soumise qu'au mouvement régulier de translation parallèlement à l'axe de la voie, en même temps que les pièces mobiles du mécanisme restent périodiquement dans la même position relative, on dirait que la machine est stable. Dans la pratique, cette stabilité ne se réalise pas; ainsi on remarque que la machine oscille autour d'un axe vertical, et que sous l'influence de ce mouvement, appelé *mouvement de lacet*, et celui de progression, elle avance en serpentant; elle oscille égale-

ment autour d'un axe horizontal transversal à la voie, et prend ce que l'on appelle un *mouvement de galop;* elle exécute encore un *mouvement de roulis*, c'est-à-dire d'oscillation autour d'un axe parallèle à la voie; enfin elle exécute en outre, par rapport au mouvement de progression le long des rails, un mouvement relatif alternatif *d'avance et de recul*, que l'on a appelé improprement *mouvement de tangage* ou *mouvement de recul.*

Les causes de ces mouvements nuisibles au degré de stabilité d'une locomotive sont dus au mode de construction et d'entretien de la voie, ainsi qu'à celui de la locomotive, à l'inertie des pièces mobiles de la machine, et aux réactions intérieures produites par la vapeur.

Par l'augmentation de poids des rails et la forme bombée sur un rayon de $0^m,22$ à $0^m,45$ donnée au champignon, on a atténué ces mouvements parasites; on les a diminués aussi par la perfection apportée dans la construction des machines, et depuis quelque temps l'usage des contre-poids appliqués sur les roues motrices, à l'opposé de la manivelle, a produit de bons effets relativement à l'influence de l'inertie des pièces mobiles de la machine.

Aujourd'hui les contre-poids sont réglés d'après une règle donnée par M. Le Chatelier en 1849. Depuis cette époque, les effets des contre-poids ont été soumis à l'analyse successivement par MM. Yvon-Villarceau, Couche et Resal. Il faut espérer que ces quatre auteurs finiront par arriver à la même solution de ce problème si complexe, afin que leurs travaux soient plus utiles à la pratique, qui a besoin d'être éclairée, et qui ne peut progresser qu'avec prudence dans une pareille innovation.

**469.** *Dimensions des parties principales des machines locomotives.*

*Boîte à feu.* Elle a la forme d'un parallélipipède rectangle. La première enveloppe est en cuivre rouge de première qualité, dont une seule feuille forme le ciel et les faces latérales. L'enveloppe extérieure est en tôle de fer; elle est réunie à l'enveloppe intérieure par des entretoises en cuivre de $0^m,02$ de diamètre, à vis sur toute leur longueur, à tête rabattue des deux côtés, et espacées de $0^m,10$ les unes des autres d'axe en axe.

*Grille.* La grille occupe toute la base de la boîte à feu. La hauteur de la face supérieure de la grille au-dessus de l'arête inférieure de la boîte à feu est de $0^m,12$ environ. Pour que l'air entre facilement dans le foyer, la boîte à feu doit se trouver à $0^m,35$ au moins au-dessus du sol. Le dessus de la boîte à feu est à $0^m,35$ ou $0^m,45$ au-dessous de l'arête supérieure du corps cylindrique de la chaudière, et il doit être couvert de $0^m,10$ d'eau. La porte du foyer est placée à $0^m,90$ ou $0^m,95$ au-dessus de la grille.

Les barreaux de la grille sont en fer forgé ou laminé; ils ont habituellement $0^m,10$ de hauteur au milieu; leur largeur varie de $0^m,020$ à $0^m,025$ en haut et de $0^m,010$ à $0^m,015$ en dessous. Leur écartement ne

doit guère dépasser la limite de $0^m,020$ à $0^m,025$ ; cependant on augmente cet écartement quand le coke est impur et produit du mâchefer.

L'épaisseur du combustible sur la grille varie de $0^m,50$ à $0^m,70$. Un kilogramme de coke consomme 18 mètres cubes d'air froid (292), et produit, quand il est bon, 6 et le plus souvent 6,5 kilog. de vapeur (308 et 467).

*Tubes.* Les tubes étaient en cuivre rouge; mais aujourd'hui on les fait en laiton, qui est moins promptement usé par le frottement des particules de coke entraînées par la fumée. L'épaisseur d'eau qui les sépare varie de $0^m,013$ à $0^m,020$, et il convient, pour que les dépôts y adhèrent moins et que la vapeur se dégage facilement, de se rapprocher de l'écartement supérieur, qui affaiblit encore moins les plaques quand on change les tubes.

Les viroles ont $0^m,002$ d'épaisseur; elles sont en acier, et quelquefois en fer pour le côté de la boîte à fumée.

*Cheminée.* En France, la hauteur totale de la locomotive ne pouvant dépasser $4^m,25$ au-dessus du rail, la hauteur des ouvrages d'art étant de $4^m,30$, il en résulte que la hauteur de la cheminée proprement dite n'est que de $1^m,60$ à $2^m,00$, selon la hauteur de la chaudière (416). La cheminée est formée d'une seule feuille de tôle, et elle est garnie à la partie supérieure d'un capuchon que l'on ferme pendant les temps d'arrêt.

*Roues.* Aujourd'hui, le moyeu, les bras et le faux-bandage sont le plus souvent d'une seule pièce. Quand il n'en est pas ainsi, les bras sont réunis par la coulée du moyeu. La jante se place à chaud, et on la fixe sur les bras par des boulons (442).

La largeur totale de la jante est en général de $0^m,14$. La saillie du boudin varie de $0^m,03$ à $0^m,04$, et son épaisseur de $0^m,04$ à $0^m,06$. La machine étant placée au milieu de la voie, il y a un jeu de $0^m,01$ à $0^m,02$ entre chaque boudin et le rail, ce qui donne à la machine un jeu de $0^m,02$ à $0^m,04$.

*Distance des essieux extrêmes.* Le rayon minimum des courbes varie, suivant les voies, entre 300 et 1000 mètres.

Pour une vitesse maxima de 60 kilomètres à l'heure, la limite raisonnable d'écartement des essieux paraît devoir être de $3^m,50$ pour un rayon minimum de 600 mètres (449), ce rayon minimum pouvant être de 300 mètres à une station où l'on arrête toujours, et de 200 mètres sur les voies de service et les croisements. Cette limite raisonnable d'écartement est de 4 mètres, quand les rayons précédents sont respectivement 1000 mèt., 500 mèt. et 300 mèt.

La distance des essieux extrêmes doit, du reste, être plus petite pour les machines à roues accouplées que pour celles à roues libres, qui se déplacent plus facilement sur les courbes; c'est ce qui explique pourquoi, dans les machines Crampton, on a pu porter cette distance à $4^m,86$ pour le chemin du Nord.

*Ressorts.* Les ressorts se faisaient en acier ordinaire cémenté; aujourd'hui ils sont en acier fondu; dans les premiers, le nombre de feuilles variait de 17 à 22, et dans les seconds il n'est que de 8 ou 10.

*Pistons.* Les pistons à vapeur ont pour garniture deux cercles superposés en bronze, et de préférence en fonte, rarement ils sont en acier; chaque cercle a ordinairement $0^m,03$ de hauteur, de sorte que la garniture a $0^m,06$. Près de la fente, l'épaisseur des cercles varie de $0^m,02$ à $0^m,05$, et cette épaisseur va en augmentant jusqu'à l'extrémité opposée du diamètre.

*Tiroirs.* Les tiroirs sont en bronze, et de préférence en fonte, qui a plus de durée sans réparation, donne de plus belles surfaces frottantes, mais nécessite plus de soins de graissage.

*Tuyaux à vapeur.* La section intérieure des tuyaux de prise de vapeur varie de 1/10 à 1/12 de celle de chaque cylindre, et celle des tuyaux de bifurcation doit être égale à la moitié au moins de la précédente. La section du tuyau d'échappement est habituellement, pour chaque cylindre, égale à celle du tuyau de prise de vapeur, c'est-à-dire à environ le 1/10 de l'aire du piston; si le tuyau est commun aux deux cylindres, cette section doit être doublée.

*Pompes.* Pour déterminer le volume des pompes alimentaires, on calcule le poids de vapeur correspondant à 4 cylindrées, on augmente ce poids calculé à l'aide de la table du n° 272 de 30 pour 100, afin de tenir compte de l'eau entraînée, et le résultat trouvé est le volume en litres que doit fournir chaque pompe par coup de piston, car une seule pompe doit pouvoir faire le service de la machine. Comme une pompe ne donne que 60 pour 100 d'effet utile, et qu'elle ne doit fonctionner que pendant le 1/3 du temps d'activité de la machine, son volume doit donc être égal à celui de l'eau à fournir multiplié par $1,5 \times 3 = 4,5$. Le diamètre du piston est habituellement de $0^m,10$ et la course de $0^m,10$ à $0^m,14$. La bielle qui commande le plongeur doit avoir au moins $0^m,40$ de longueur. Chaque pompe puise son eau dans le tender à l'aide d'un tuyau en cuivre rouge de $0^m,05$ environ de diamètre et de $0^m,003$ d'épaisseur; ce tuyau est disposé de manière à permettre les mouvements relatifs de la machine par rapport au tender. Chaque pompe a également un tuyau de refoulement en cuivre rouge de même diamètre et de même épaisseur que le tuyau d'aspiration.

Les pompes sont garnies de trois soupapes à boulet, une d'aspiration et deux de refoulement.

*TABLEAU des dimensions principales de quelques machines locomotives* (extrait du *Guide du Mécanicien*).

LÉGENDE.

N° 1. Ce type, établi par Sharp et Roberts, en 1840, pour le chemin de Versailles, quoique d'une puissance inférieure à celle des machines actuelles, est encore en ser-

vice sur beaucoup de chemins, où la bonne disposition de toutes ses parties et sa solidité l'ont fait résister au temps.

N° 2. Ces machines ont été construites par Stephenson, en 1843, pour le service des voyageurs sur le chemin de fer de Paris à Orléans; elles appartiennent à son premier type de machines à longues chaudières; elles sont à cylindres et à châssis intérieurs. C'est sur ces machines que la coulisse a été importée en France; elles ont toujours fait un bon service.

N° 3. Ces machines à voyageurs, du chemin de fer de Lyon, ont été construites, en 1847, d'après les plans de M. Al. Barrault, par MM. Derosne et Cail; elles ont été le point de départ de la réaction légitime qui a eu lieu contre le système des trois essieux intercalés entre la boîte à feu et la boîte à fumée de R. Stephenson. Le diamètre des roues motrices et la répartition du poids sont très-convenables. Le réservoir de vapeur manque de capacité et surtout de hauteur dans le corps cylindrique de la chaudière; elles primeut avec une grande facilité.

N° 4. Ce type a été construit en 1849, par MM. Derosne et Cail, sur les plans d'ensemble de M. Crampton, pour le service des trains *express* du chemin de fer du Nord. Tout le monde paraît à peu près d'accord sur la nécessité de réduire leur poids et la distance des essieux extrêmes; on peut, sans inconvénient, réduire la surface de chauffe dans une proportion assez notable. Le mécanisme de la distribution est entièrement placé à l'extérieur.

N° 5. Ces machines *mixtes*, du chemin de fer de l'Ouest, ont été construites, en 1848, par M. Cavé, d'après un type spécial que M. E. Gouin avait étudié en 1847. Les cylindres et le châssis sont intérieurs, et les roues motrices sont accouplées avec les roues d'arrière, qui sont placées en avant du foyer. Ces machines, à part une certaine propension à l'entraînement de l'eau, résultant de l'insuffisance de la hauteur du réservoir de vapeur dans le corps cylindrique de la chaudière, sont dans de bonnes conditions; elles sont parfaitement appropriées au service du chemin de fer de l'Ouest, dont le profil, entre Paris et Chartres, présente, sur un quart de sa longueur, des pentes et rampes de $0^m,006$ à $0^m,010$ par mètre, et dont les convois sont formés par la réunion de voitures à voyageurs et de wagons à marchandises.

N° 6. Ces machines *mixtes*, du chemin de fer de Lyon, ont été construites, en 1849, par M. E. Gouin, d'après les plans de MM. Sharp frères. Les cylindres sont intérieurs et inclinés, pour que les tiges des pistons et les glissières puissent passer au-dessus de l'essieu des roues d'avant, qui sont accouplées avec les roues du milieu. Ces machines ont une grande surface de chauffe et un grand réservoir de vapeur; elles font un excellent service. Quelques-unes de ces machines ont été montées sur des roues de $1^m,80$ de diamètre.

N° 7. Ce sont des *machines à marchandises* construites en 1849 par M. C. Polonceau dans les ateliers du chemin d'Orléans. Le diamètre de leurs roues permet de les affecter au service des voyageurs. Les cylindres sont intérieurs et les boîtes du tiroir extérieures, de telle sorte que le mécanisme de la distribution est compris entre les roues et le châssis extérieur. Les bielles d'accouplement sont appliquées sur des manivelles en fer forgé, calées sur le prolongement des fusées, au delà du châssis extérieur. Ces machines sont dans de très-bonnes conditions de stabilité, de vaporisation et d'économie de vapeur. Le faible écartement des roues extrêmes, obtenu sans inconvénient, en donnant du porte-à-faux aux cylindres en avant du premier essieu, atténue l'inconvénient qui résulte de l'accouplement des roues motrices avec les roues d'arrière.

N° 8. Ces *machines à marchandises*, du chemin de Strasbourg, ont été établies, en 1850, par MM. Derosne et Cail, d'après le type de celles sorties en 1845 des ateliers de Stephenson pour le chemin d'Orléans. Les cylindres sont intérieurs et les six roues sont accouplées et placées entre la boîte à feu et la boîte à fumée. Ces machines sont susceptibles de faire un très-bon service, et leur modèle est généralement adopté aujourd'hui lorsqu'on accouple les six roues.

| DÉTAILS. | NUMÉRO. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CHEMIN. | Versailles. | Orléans. | Lyon. | Nord. | Ouest. | Lyon. | Orléans. | Strasbourg. |
| | SERVICE. | Voyageurs. | Voyageurs. | Voyageurs. | Crampton. | Mixte. | Mixte. | Marchand. | Marchand. |
| | DATE de la construction. | 1840 | 1843 | 1847 | 1849 | 1848 | 1849 | 1849 | 1850 |
| *Boîte à feu.* | | | | | | | | | |
| | | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. |
| Longueur de la grille | | 1.028 | 0.925 | 1.050 | 1.370 | 1.000 | 1.203 | 0.922 | 1.050 |
| Largeur *id.* | | 1.018 | 0.919 | 0.900 | 1.018<br>1.040 | 0.920 | 1.042 | 1.072 | 0.904 |
| Surface *id.* | | 1.046 | 0.851 | 0.945 | 1.418 | 0.920 | 1.253 | 0.988 | 0 949 |
| Hauteur du 1er rang de tubes au-dessus de la grille | | 0.530 | 0.566 | 0.697 | 0.560 | 0.680 | 0.870 | 0.555 | 0.738 |
| Hauteur du ciel du foyer au-dessus de la grille | | 1.168 | 1.400 | 1.350 | 1.313 | 1.280 | 1.505 | 1.320 | 1.350 |
| *Chaudière.* | | | | | | | | | |
| Nombre de tubes | | 162 | 160 | 145 | 178 | 145 | 155 | 180 | 143 |
| Longueur des tubes | | 2.550 | 3.680 | 3.488 | 3.615 | 3.920 | 3.226 | 3.760 | 3.927 |
| Diamètre intérieur des tubes | | 0.039 | 0.037 | 0.046 | 0.047 | 0.045 | 0.046 | 0.043 | 0.045 |
| Épaisseur des tubes | | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| Surface totale des tubes | | 50.012 | 63.300 | 76.250 | 94.962 | 80.330 | 77.600 | 90.396 | 82.940 |
| *Id.* du foyer | | 5.868 | 5.090 | 5.900 | 7.377 | 5.500 | 7.860 | 6.252 | 5.810 |
| *Id.* de chauffe totale | | 55.880 | 68.390 | 82.150 | 102.339 | 85.830 | 85.460 | 96.648 | 88.720 |
| Écartement moyen intérieur des 2 enveloppes du foyer | | 0.080 | 0.076<br>0.071 | 0.076<br>0.126 | 0.066<br>0.077 | 0.077 | 0.079<br>0.076 | 0.100 | 0.076<br>0.106 |
| Diamètre intérieur du corps cylindrique | | 1.115 | 0.982<br>0.921 | 1.036<br>1.076 | 1.200 | 1.060 | 1.146 | 1.270 | 1.190 |
| Longueur *id.* | | 2.434 | 3.564 | 3.410 | 3.550 | 3.845 | 3.400 | 3.620 | 3.850 |
| Épaisseur de la tôle | | 0.010 | 0.010 | 0.012 | 0.010 | 0.010 | 0.012 | 0.011 | 0.011 |
| *Id.* de la tôle de la boîte à feu extérieure | | 0.010 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0 011 | 0.012 | 0.012 | 0.012 |
| *Id.* du cuivre du ciel du foyer | | 0.010 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 |
| *Id.* du cuivre des parois latérales | | 0.010 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 |
| *Id.* du cuivre de la plaque des tubes | | 0.020 | 0.022 | 0.022<br>0.012 | 0.025<br>0.012 | 0.025 | 0.025<br>0.014 | 0.024 | 0.023<br>0.012 |
| Pour 0m.10 d'eau au-dessus du foyer. | Volume d'eau contenu dans la chaudière. | 1.615 | 1.754 | 2.300 | 2.779 | 2.536 | 2.000 | 3.060 | 2.370 |
| | Volume de vapeur *id.* | 1.195 | 0.824 | 0.928 | 0.613 | 1.326 | 1.540 | 1.120 | 1.450 |
| | Distance de l'eau à l'arête supérieure du corps cylindrique | 0.350 | 0.205 | 0.206 | 0.245 | 0.270 | 0.326 | 0.350 | 0.365 |
| *Boîte à fumée.* | | | | | | | | | |
| Longueur intérieure | | 0.634 | 0.820 | 0.623 | 0.675 | 0.822 | 0.762 | 0.800 | 0.805 |
| Largeur | | 1.250 | 1.120 | 1.244 | 1.200 | 1.234 | 1.304 | 1.400 | 1.196 |
| Hauteur | | 1.740 | 1.120 | 1.200 | 1.200 | 1.100 | 1.367 | 1.395 | ronde. |
| Capacité (moins le volume des cylindres) | | 0.969 | 1.018 | 0.754 | 0.763 | 1.000 | 0.898 | 1.237 | 0.895 |
| Épaisseur de la plaque des tubes | | 0.016 | 0.015 | 0.017 | 0.015 | 0.015 | 0.016 | 0.016 | 0.017 |
| Épaisseur des parois latérales | | 0.007 | 0.009 | 0.008 | 0.010 | 0.008 | 0.006 | 0.008 | 0.010 |
| *Cheminée.* | | | | | | | | | |
| Diamètre intérieur | | 0.350 | 0.330 | 0.380 | 0.400 | 0.330 | 0.400 | 0.400 | 0.400 |
| Épaisseur de la tôle | | 0.003 | 0.004 | 0.003 | 0.003 | 0.005 | 0.004 | 0.004 | 0.003 |
| Hauteur au-dessus de la boîte à fumée | | 1.680 | 1.925 | 1.820 | 1.950 | 1.705 | 1.917 | 1.965 | 1.570 |
| *Alimentation.* | | | | | | | | | |
| Diamètre des plongeurs | | 0.045 | 0.107 | 0.050 | 0.064 | 0.105 | 0.052 | 0.105 | 0.105 |
| Course *id.* | | 0.464 | 0.414 | 0.600 | 0.550 | 0.446 | 0.560 | 0.440 | 0.416 |
| Volume engendré par coup de piston, en décimètres cubes | | 0.730 | 1.025 | 1.274 | 1.760 | 1.004 | 1.180 | 1.210 | 1.004 |
| Diamètre cylindrique des siéges des clapets | | 0.038 | 0.060 | 0.050 | 0.060 | 0.045 | 0.048 | 0.060 | 0.052 |
| Levée des soupapes | | 0.024 | 0.020 | 0.016 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.010 | 0.012 |
| Section d'écoulement par les soupapes | | 0.00113 | 0.0016 | 0.00176 | 0.0016 | 0.0011 | 0.00118 | 0.0019 | 0.001356 |
| Diamètre des tuyaux d'aspiration | | 0.040 | 0.050 | 0.052 | 0.064 | 0.045 | 0.052 | 0.055 | 0.052 |
| *Id.* de refoulement | | 0.040 | 0.050 | 0.052 | 0.064 | 0.045 | 0.054 | 0.055 | 0.052 |
| Épaisseur des tuyaux | | 0.004 | 0.003 | 0.0025<br>0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.0025 | 0.0025 | 0.0025<br>0.003 |
| *Prise de vapeur.* | | | | | | | | | |
| Section d'ouverture maxima du régulateur | | 0.0136 | 0.0125 | 0.0132 | 0.0132 | 0.0132 | 0.0134 | 0.0105 | 0.0132 |
| Diamètre intérieur du tuyau de prise de vapeur | | 0.120 | 0.125 | 0.125 | 0.145 | 0.125 | 0.138 | 0.115 | 0.125 |
| Épaisseur *id.* | | 0.004 | 0.004 | 0.003 | 0.0025 | 0.003 | 0.010 | 0.0013 | 0.012 |
| Diamètre des tuyaux allant aux cylindres | | 0.090 | 0.087 | 0.100 | 0.120 | 0.100 | 0.138 | 0.100 | 0.100 |
| *Échappement.* | | | | | | | | | |
| Diamètre du tuyau d'échappement | | 0.100 | 0.060 | 1.140 | 0.160 | 0.115 | 0.230<br>0.080 | 0.130 | 0.110 |
| Section maxima de la tuyère d'échappement | | 0.0100 | 0.0120 | 0.01595 | 0.0220 | 0.0103 | 0.01375 | 0.01474 | 0.011309 |
| Section minima *id.* | | 0.0040 | 0.0023 | 0.0031 | 0.0025 | 0.0025 | 0.00472 | 0.0027 | 0.00386 |
| Longueur totale de la cond. d'échappement depuis le tiroir | | 1.950 | 1.400 | 2.100 | 2.425 | 1.500 | 1.882 | 2.150 | 1.600 |
| Épaisseur des tuyaux d'échappement | | 0.004 | 0.003 | 0.003 | 0.003 | 0.005 | 0.008 | 0.003 | 0.003 |

| DÉTAILS. | NUMÉRO. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CHEMIN. | Versailles. | Orléans. | Lyon. | Nord. | Ouest. | Lyon. | Orléans. | Strasbourg. |
| | SERVICE. | Voyageurs. | Voyageurs. | Voyageurs. | Crampton. | Mixte. | Mixte. | Marchand. | Marchand. |
| | DATE de la construction. | 1840 | 1843 | 1847 | 1849 | 1848 | 1849 | 1849 | 1850 |
| *Distribution.* | | | | | | | | | |
| Angle d'avance | | 30° | av. 30° 3/5 ar. 36° 3/6 | 30° | 15° | 30° | 33° | av. 21° ar. 10° | 30° |
| | | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. |
| Avance linéaire à l'introduction | | 0.006 | » | 0.005 | 0.004 | 0.005 | 0.0065 | 0.002 | 0.005 |
| *Id.* à l'échappement | | 0.027 | 0.016 | 0.028 | 0 032 | 0.030 | 0.009 | 0.035 | 0.028 |
| Recouvrement intérieur de chaque côté | | 0.003 | 0.0068 | 0.001 | 0.0068 | 0.0055 | 0.001 | 0.005 | 0.001 |
| *Id.* extérieur *id.* | | 0.023 | 0.0315 | 0.024 | 0.028 | 0.023 | 0.021 | 0.025 | 0.024 |
| Maxima d'introduction de vapeur, la course étant 1 | | 0.808 | 0.760 | 0.790 | 0.800 | 0.820 | 0.770 | 0.700 | 0.790 |
| Minima *id.* | | » | 0.320 | 0.250 | 0.250 | 0.250 | 0.260 | 0 180 | 0 250 |
| Rayon d'excentricité | | 0.048 | 0.057 | 0.058 | 0 092 | 0.058 | 0.065 | 0.070 | 0.058 |
| Course des tiroirs | | 0.115 | 0.114 | 0.116 | 0.184 | 0.116 | 0 103 | 0.100 | 0.116 |
| Lumière d'admission | Longueur | 0.192 | 0 2535 | 0.300 | 0.300 | 0 250 | 0.305 | 0.320 | 0.250 |
| | Largeur | 0.044 | 0.033 | 0.040 | 0.050 | 0.040 | 0.046 | 0.038 | 0.040 |
| | Section | 0.00836 | 0.00835 | 0.012 | 0.015 | 0.010 | 0.014 | 0 012 | 0.010 |
| Longueur développée du conduit d'admission | | 0.250 | 0 320 | 0.380 | 0.400 | 0.275 | 0.310 | 0.360 | 0.320 |
| Volume du conduit d'admission | | 0.00209 | 0.00267 | 0.0045 | 0.006 | 0.00275 | 0.00434 | 0.0043 | 0.0032 |
| Lumière d'échappement | Longueur | 0.192 | 0.2535 | 0.300 | 0.300 | 0.250 | 0.305 | 0.320 | 0.250 |
| | Largeur | 0 070 | 0.060 | 0.080 | 0 090 | 0.075 | 0 085 | 0.073 | 0.076 |
| | Section | 0.01344 | 0.015 | 0 024 | 0.027 | 0.01875 | 0 026 | 0.02336 | 0.019 |
| Tiroirs | Longueur | 0.270 | 0.228 | 0.248 | 0.286 | 0 243 | 0.262 | 0.243 | 0.244 |
| | Largeur | 0 260 | 0.3155 | 0.358 | 0.360 | 0.200 | 0.365 | 0.370 | 0.344 |
| | Surface | 0.0702 | 0.0719 | 0.08378 | 0.1029 | 0,073 | 0.0956 | 0.0899 | 0.0766 |
| *Transmission.* | | | | | | | | | |
| Écartement d'axe en axe des cylindres | | 0.713 | 0.752 | 1.882 | 1.850 | 0.750 | 0.670 | 1.020 | 0.750 |
| Inclinaison des cylindres | | 0° | 0° | 0° | 0° | 0° | 5° | 0° | 7° |
| Diamètre *id.* | | 0.330 | 0.355 | 0.380 | 0.400 | 0.380 | 0.400 | 0.440 | 0.380 |
| Longueur totale intérieure | | 0.600 | 0.666 | 0.732 | 0.682 | 0.680 | 0.692 | 0.731 | 0.735 |
| Course des pistons | | 0.460 | 0.540 | 0.600 | 0.550 | 0.560 | 0.560 | 0.600 | 0.610 |
| *Liberté moyenne des cylindres* | | 0.010 | 0.020 | 0.014 0.013 | 0.020 | 0.021 | 0.014 0.014 | 0.020 | 0.016 0.008 |
| Longueur de la bielle | | 1.425 | 1.294 | 1.610 | 2.310 | 1.400 | 1.670 | 1.450 | 1.550 |
| Diamètre du bouton de la manivelle | | 0.150 | 0.155 | 0.085 | 0.125 | 0.160 | 0.165 | 0.180 | 0.160 |
| Longueur *id.* | | 0.090 | 0.102 | 0.100 | 0.120 | 0.100 | 0.096 | 0.110 | 0.102 |
| *Châssis.* | | | | | | | | | |
| Écartement des longerons d'axe en axe | | 1.810 | 1.220 | 1.210 | 1.282 2.418 | 1.225 | 1.260 | 2.080 | 1.226 |
| Hauteurs des longerons | | 0.240 | 0.117 | 0.200 | 0.220 | 0.200 | 0.260 0.340 | 0.230 | 0.200 |
| Épaisseur de la tôle | | 0.010 | 0 025 | 0.030 | 0.025 | 0.030 | 0.026 | 0.008 | 0.030 |
| *Id.* du bois | | 0.070 | 0.022 | » | » | » | » | 0.064 | » |
| Hauteur de l'axe des tampons au-dessus des rails | | 0.880 | 1.055 | 0.980 | 0.950 | 1.000 | 0.980 | 1.020 | 0.990 |
| Écartement des tampons d'axe en axe | | 1.800 | 1.860 | 1.710 | 1.727 | 1.740 | 1.710 | 1.740 | 1.710 |
| *Ressorts.* | | | | | | | | | |
| Ressorts de l'essieu du milieu | Longueur | 0.778 | 0.930 | 0.950 | 0.966 | 1.010 | 0.710 | 0.925 | 0.860 |
| | Largeur | 0.100 | 0.085 | 0.090 | 0.100 | 0.090 | 0.090 | 0.090 | 0.090 |
| | Hauteur au milieu | 0.125 | 0.152 | 0.179 | 0.115 | 0.190 | 0.140 | 0.108 | 0.103 |
| | Flèche sous charge | 0.100 | 0 050 | 0.075 | 0.115 | 0.025 | 0.060 | 0 082 | 0.045 |
| Ressorts de l'essieu d'avant | Longueur | 0.778 | 0.950 | 0.950 | 0.966 | 1.010 | 0.710 | 0.950 | 0.860 |
| | Largeur | 0.100 | 0.088 | 0.090 | 0.100 | 0 090 | 0.090 | 0 090 | 0.090 |
| | Hauteur au milieu | 0.118 | 0 135 | 0.179 | 0.150 | 0.180 | 0.140 | 0.144 | 0.108 |
| | Flèche sous charge | 0.100 | 0.058 | 0.070 | 0.172 | 0.029 | 0.060 | 0.070 | 0.045 |
| Ressorts de l'essieu d'arrière | Longueur | 0.675 | 0.950 | 0.976 | 0.966 | 1.010 | 1.200 | 0.925 | 0.860 |
| | Largeur | 0.074 | 0.088 | 0.060 | 0 100 | 0.090 | 0.105 | 0.090 | 0 090 |
| | Hauteur au milieu | 0.070 | 0.150 | 0.190 | 0.150 | 0.190 | 0.170 | 0.120 | 0.108 |
| | Flèche sous charge | 0.090 | 0.050 | 0.070 | 0.172 | 0.025 | 0.158 | 0.082 | 0.045 |
| *Roues et essieux.* | | | | | | | | | |
| Diamètre des roues | du milieu | 1.660 | 1.700 | 1.800 | 1.220 | 1.600 | 1.600 | 1.500 | 1.420 |
| | d'avant | 1.050 | 1.102 | 1.100 | 1.350 | 1.400 | 1.600 | 1.000 | 1.420 |
| | d'arrière | 1.050 | 1.102 | 1.100 | 2.100 | 1.600 | 1.100 | 1.500 | 1.420 |
| Essieu du milieu | Diamètre de la fusée | 0.102 | 0.152 | 0.165 | 0.180 | 0.160 | 0.165 | 0.140 | 0.165 |
| | Longueur *id.* | 0.144 | 0.153 | 0.160 | 0 250 | 0.152 | 0.170 | 0.170 | 0.150 |
| | Diamètre à la portée de calage | 0.165 | 0.177 | 0.185 | 0.190 | 0.178 | 0 186 | 0 176 | 0 180 |
| | Diamètre au milieu | 0.152 | 0.146 | 0.160 | 0.150 | 0 152 | 0.160 | 0.170 | 0.155 |
| Essieu d'avant | Diamètre de la fusée | 0.087 | 0.127 | 0.160 | 0.150 | 0.145 | 0 165 | 0.120 | 0.160 |
| | Longueur *id.* | 0.150 | 0.178 | 0.180 | 0.300 | 0.180 | 0.180 | 0.190 | 0.180 |
| | Diamètre à la portée de calage | 0.127 | 0.147 | 0.180 | 0.230 | 0 160 | 0.186 | 0.161 | 0.180 |
| | Diamètre au milieu | 0.108 | 0.129 | 0.145 | 0.160 | 0.135 | 0.155 | 0.140 | 0.150 |

| DÉTAILS. | NUMÉRO. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CHEMIN. | Versailles. | Orléans. | Lyon. | Nord. | Ouest. | Lyon. | Orléans. | Strasbourg. |
| | SERVICE. | Voyageurs. | Voyageurs. | Voyageurs. | Crampton. | Mixte. | Mixte. | Marchand. | Marchand. |
| | DATE de la construction. | 1840 | 1843 | 1847 | 1849 | 1848 | 1849 | 1849 | 1850 |
| | | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. |
| Essieu d'arrière. | Diamètre de la fusée. | 0.087 | 0.118 | 0.160 | 0.180 | 0.160 | 0.130 | 0.140 | 0.160 |
| | Longueur *id.* | 0.150 | 0.160 | 0.180 | 0.260 | 0.180 | 0.150 | 0.190 | 0.180 |
| | Diamètre à la portée de calage. | 0.127 | 0 146 | 0.180 | 0.210 | 0.178 | 0 150 | 0.176 | 0.180 |
| | Diamètre au milieu. | 0.108 | 0.120 | 0.145 | 0.172 | 0.146 | 0.125 | 0.145 | 0.150 |
| Écartement intérieur des roues. | | 1.360 | 1.375 | 1.360 | 1.355 | 1.365 | 1.360 | 1.370 | 1.355 |
| *Id.* intérieur des rails. | | 1.440 | 1.400<br>1.450 | 1.450 | 1.440 | 1.450 | 1.450 | 1.440<br>1.450 | 1.440 |
| *Id.* des essieux extrêmes. | | 3.444 | 3.338 | 4.015 | 4.860 | 3.440 | 4.230 | 3.425 | 3.350 |
| *Id.* des deux essieux d'avant. | | 1.824 | 1.858 | 1.800 | 2.300 | 1.740 | 2.215 | 1.545 | 1.845 |
| Bandages. | Largeur. | 0.135 | 0.128<br>0.160 | 0.140 | 0.140 | 0.140 | 0.140 | 0.135 | 0.140 |
| | Épaisseur au milieu. | 0.040 | 0.050 | 0.050 | 0.055 | 0.050 | 0 050 | 0.050 | 0.050 |
| | Saillie du boudin. | 0.025 | 0.025 | 0.040 | 0.039 | 0.038 | 0.030<br>0.040 | 0.033 | 0.040 |
| | Conicité sur le rail. | 1/20 | 1/20 | 1/20 | 1/20 | 1/20 | 1/20 | 1/20 | 1/20 |
| *Poids* (en kilogrammes). | | | | | | | | | |
| | | | k. | k. | k. | k. | k. | k. | k. |
| Essieu du milieu monté. | | » | 2445 | 2600 | 1554 | 2324 | 2155 | 1963 | 2090 |
| *Id.* d'avant *id.* | | » | 995 | 1300 | 1767 | 1105 | 1880 | 1135 | 1811 |
| *Id.* d'arrière *id.* | | » | 995 | 1300 | 3185 | 2112 | 1095 | 1908 | 1811 |
| Machine chargée avec 15 c. d'eau. | Poids sur l'essieu du milieu | » | 6810 | 9312 | 3337 | 8400 | 8904 | 8065 | 6551 |
| | *Id.* d'avant. | » | 2335 | 8087 | 9376 | 6100 | 7217 | 6140 | 6551 |
| | *Id.* d'arrière. | » | 5100 | 2614 | 8100 | 3000 | 1175 | 6660 | 6551 |
| | Poids total de la machine. | » | 19190 | 25213 | 27319 | 23041 | 25426 | 25865 | 25365 |
| Poids total de la machine vide. | | » | 16750 | 22600 | 24197 | 20500 | 22080 | 22160 | 22200 |
| *Tender.* | | | | | | | | | |
| Poids d'eau complet. | | » | 4520 | 6000 | 6390 | 4000 | 5500 | 4 520 | 5000 |
| Poids de coke. | | » | 1350 | 1500 | 1225 | 1800 | 1000 | 2 175 | 2000 |
| Poids vide avec agrès. | | » | 4870 | 11826 | 9951 | 8000 | 8900 | 4 870 | 8720 |
| Poids plein. | | » | 10740 | 19326 | 17566 | 13800 | 15400 | 118 65 | 15720 |

*TABLEAU des dimensions principales de quelques locomotives système Engerth* (461).

| DÉTAILS. | CHEMIN. | Sommering. | Midi. | Nord. | Lyon. | Est et Nord | Nord (mixte). |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | CONSTRUCTEUR. | Seraing. | Kessler. | Seraing. | Creuzot. | Creuzot. | Cavé. |
| | DATE de la construction. | 1854 | 1856 | 1855 | 1855 | 1856 | 1856 |
| | | m. | m. | m. | m. | m. | m. |
| Grille. | Longueur. | 1.26 | 1.66 | 1.415 | 1.65 | 1.41 | 1.28 |
| | Largeur. | 0.98 | 1.08 | 1.37 | 1.10 | 1.37 | 1.05 |
| Hauteur du premier rang de tubes au-dessus de la grille. | | 0.45 | » | 0.756 | 0.80 | » | 0.89 |
| Hauteur du ciel du foyer au-dessus de la grille. | | » | » | » | » | 1.66 | » |
| Tubes. | Nombre. | 187 | 197 | 234 | 203 | 234 | 180 |
| | Longueur. | 4.74 | 4.75 | 5.043 | 4.75 | 5.04 | 4.54 |
| | Diamètre extérieur. | » | » | » | 0.055 | 0.056 | » |
| Cheminée. | Diamètre | 0.40 | 0.45 | 0.42 | » | » | 0.40 |
| | Hauteur au-dessus de la boîte à fumée. | 2.10 | 1.60 | 1.38 | » | » | 1.50 |
| Diamètre du corps cylindrique de la chaudière. | | » | » | » | » | 1.50 | » |
| Surface de chauffe. | Tubes. | 155.0 | 144.0 | 184.0 | 151.38 | 184 | » |
| | Foyer. | 6.47 | 9.75 | 10.35 | 9.75 | 10.35 | » |
| Capacité de la chambre de vapeur. | | » | 2.035 | 2.450 | 2.100 | 2.450 | 1.464 |
| Volume d'eau dans la chaudière. | | » | » | » | » | 4.855 | » |
| Poids sur le tender. | Eau. | » | » | » | 6800 | 8200 | » |
| | Coke. | » | » | » | 1500 | 1800 | » |
| Poids de la machine vide, tender compris. | | » | » | » | » | 50t | » |
| *Id.* | en charge. | 56t | 57t.5 | 64t | 62t | 64t.5 | » |
| Roues motrices. | Nombre. | 6 | 6 | 8 | 6 | 8 | 4 |
| | Diamètre. | 1.10 | 1.31 | 1.26 | 1.30 | 1.264 | 1.74 |
| | Charge sur chaque essieu moteur. | » | 12t.5 | » | 12t.0 | » | » |
| Roues porteuses. | Nombre. | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 6 |
| | Diamètre. | 1.00 | 1.00 | 1.07 | 1.00 | 1.07 | 1.059 |
| Écartement des roues extrêmes. | | 6.014 | 7.02 | 8.41 | 8.07 | 9.66 | 8.00 |
| Pistons. | Diamètre. | 0.47 | 0.48 | 0.50 | 0 48 | 0.50 | 0.42 |
| | Course. | 0.62 | 0.64 | 0.66 | 0.64 | 0.66 | 0.56 |
| Lumières. | Longueur. | » | 0.315 | 0.34 | » | » | 0.36 |
| | Largeur. Entrée. | » | 0.045 | 0.04 | » | » | 0.031 |
| | Largeur. Sortie. | » | 0.095 | » | » | » | 0.085 |
| Pression de la vapeur dans la chaudière en atmosphères. | | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |

**470.** *Machines-tenders.* Extrait du cahier des charges pour la fourniture de 30 machines mixtes portant leur eau et leur coke, par M. E. Gouin, à la compagnie des chemins de fer du Midi.

Les machines sont à bâtis intérieurs, cylindres extérieurs, distribution et alimentation extérieures; elles sont à six roues, dont les quatre d'arrière accouplées. L'eau et le coke sont placés dans une caisse particulière dont la plus grande partie se trouve à l'arrière de la boîte à feu.

| | | |
|---|---|---|
| Poids de la machine vide | | 27 400 kilog. |
| *Id.* la machine et le tender remplis d'eau et de coke | | 35 000 |
| *Id.* de l'eau contenue dans la caisse du tender | | 3 600 |
| *Id.* du coke | *id.* (remplie à ras) | 1 000 |
| Au départ | Poids sur les roues d'avant | 10 500 |
| | *Id.* du milieu | 13 000 |
| | *Id.* d'arrière | 11 500 |
| Machin. pleine et tender vide | Poids sur les roues d'avant | 12 000 |
| | *Id.* du milieu | 10 500 |
| | *Id.* d'arrière | 8 000 |
| Diamètre des roues accouplées (roues motrices) | | 1m,740 |
| Écartement des roues d'avant aux roues du milieu | | 2 ,300 |
| *Id.* des roues du milieu aux roues d'arrière | | 2 ,400 |
| *Id.* total des roues d'avant aux roues d'arrière | | 4 ,700 |
| Diamètre des cylindres | | 0 ,420 |
| Course des pistons | | 0 ,560 |
| Diamètre intérieur du corps cylindrique | | 1 ,256 |
| Surface de chauffe directe, ou de la boîte à feu | | 7 ,150 |
| Surface de chauffe des tubes | | 91 ,000 |
| Surface de chauffe totale | | 98 ,150 |
| Longueur des tubes | | 3 ,500 |
| Diamètre extérieur des tubes | | 0 ,050 |
| Nombre de tubes | | 180 |
| Longueur moyenne du foyer | | 1 ,250 |
| Largeur moyenne du foyer | | 1 ,036 |
| Hauteur du dessus de la grille au ciel du foyer | | 1 ,500 |

Les trente machines seront rigoureusement identiques entre elles ; une pièce quelconque devra pouvoir s'adapter indistinctement à l'une des trente machines, sans qu'il soit nécessaire d'y retoucher en aucune manière.

Tous les écrous en fer forgé susceptibles d'être souvent manœuvrés seront cémentés et trempés à l'extérieur.

Les roues seront entièrement en fer forgé, y compris le moyeu; le fer employé pour la construction de la roue proprement dite devra provenir de fonte au bois de bonne qualité.

Les moyeux seront composés de la réunion de tous les rayons et de deux galettes ou plateaux, l'un intérieur, l'autre extérieur; ils pourront aussi, si le constructeur dispose de moyens assez puissants, être obtenus au pilon d'un seul paquet de fer avec les amorces des rayons.

Le soudage par encolage ne pourra être employé pour souder les rayons sur la jante; les différentes parties de la jante elle-même seront soudées au moyen de coins.

Le diamètre de la jante des roues couplées après tournage, pour application de bandage, est fixé à la cote rigoureuse de 1m,630; le diamètre de roulement de ces roues sera donc de 1m,740.

Pour les roues d'avant, le diamètre de la jante tournée est fixé à la cote rigoureuse de 0m,99, ce qui donne 1m,10 pour le diamètre de roulement.

Les bandages seront montés sur les roues avec un serrage de 1m,0015 pour les roues accouplées, et de 0m,001 pour les roues d'avant.

Les manivelles des essieux accouplés seront disposées de manière que la manivelle de gauche étant verticale et au-dessus de l'essieu, la manivelle de droite soit horizontale et en avant.

Les essieux ne devront présenter aucun raccordement à vives arêtes.

Les arrêts de calage seront eux-mêmes raccordés par des congés ayant pour rayons la saillie des arrêts.

Les fusées seront martelées à petits coups avec des marteaux pesant au plus

500 grammes, pour durcir la partie frottante; cette opération devra précéder un dernier coup de plane destiné à enlever les petites bosses que laissera le marteau.

Les boutons d'accouplement seront en fer cémenté et trempé.

Le montage des roues sur les essieux et des boutons de manivelles sur les roues sera fait à la presse hydraulique, et l'on devra, tout en prenant les précautions d'usage, employer une pression minima, pour les faire entrer, de 40000 kilog. pour les roues, et de 20000 kilog. pour les boutons. Tout calage qui serait obtenu par des pressions moindres serait un motif de refus des roues montées.

L'écartement intérieur des bandages sera rigoureusement de $1^m$,360 pour les roues extrêmes, et de $1^m$,368 pour les roues du milieu.

Le clavetage sur les essieux sera fait au moyen d'une clef en acier ordinaire, de $0^m$,050 de largeur et $0^m$,025 de hauteur.

Les contre-poids à placer sur les roues pour équilibrer les pièces mobiles seront calculés d'après la théorie de M. Le Chatelier, en plaçant les masses le plus près possible de la circonférence de la roue, dans le but de diminuer les poids.

Les coussinets seront montés sans aucun jeu sur les fusées et seront en bronze de 82 de cuivre pour 18 d'étain.

Dans le montage des boîtes à graisse, le constructeur devra laisser entre la plaque de garde et la boîte à graisse un jeu de $0^m$,03 en dessus et de $0^m$,03 en-dessous, pour les oscillations du ressort.

Le parallélisme des essieux ne pourra, dans aucun cas, être obtenu par des inégalités d'épaisseur, soit dans les glissières, soit dans les boîtes; les boîtes seront d'ailleurs parfaitement symétriques par rapport à l'axe des essieux.

Les glissières des boîtes à graisse seront en fonte, rivées après les longerons.

Chacun des quatre systèmes de glissières des roues couplées portera un coin de serrage. Ce coin sera en fer cémenté et trempé.

Les tiges de suspension seront attachées à des oreilles en fer forgé, fixées aux longerons.

Dans le taraudage de ces tiges, en approchant du corps lisse, on aura soin de diminuer graduellement la profondeur du filet dans le but de rendre ces tiges moins sujettes à rupture.

La douille des tiges de suspension sera cémentée et trempée, ainsi que les boulons d'articulation.

Les ressorts de suspension seront en acier fondu, de $0^m$,090 de largeur; la distance des pointes de suspension sera de $0^m$,65 pour les ressorts des roues extrêmes, et de $1^m$,00 pour les roues du milieu.

Toutes les feuilles d'un même ressort seront rigoureusement cintrées sur le même rayon de fabrication.

La flexion par 1000 kilog. de charge sera à peu près la même pour les ressorts d'avant et d'arrière; elle atteindra approximativement $0^m$ 005.

Pour les ressorts du milieu, la flexion par 1000 kilog. de charge sera d'environ 10 millimètres.

Les longerons des bâtis seront en fer forgé, martelé et fini au laminoir, et d'une seule pièce avec les plaques de garde.

La traverse d'avant sera en bois de chêne de choix, garnie d'une tôle d'armature de $0^m$,008 d'épaisseur; elle recevra deux tampons en caoutchouc à quatre rondelles, et un crochet à trois rondelles en caoutchouc, avec tendeur.

La traverse d'arrière, en bois de chêne armé d'une tôle portera des tampons en caoutchouc à cinq rondelles, un crochet d'attelage à cinq rondelles en caoutchouc, avec tendeur et deux chaînes de sûreté.

La chaudière sera de même système que celles des dernières machines Crampton, livrées à la compagnie des chemins de fer du Nord par M. Cail; l'épaisseur de la tôle sera de $0^m$,011.

Le corps cylindrique aura $1^m$,256 de diamètre intérieur et contiendra 180 tubes de $3^m$,50 de longueur de dehors en dehors des deux plaques tubulaires.

L'ensemble de la chaudière sera enveloppé de douves en bois de chêne de 16 millimètres d'épaisseur, assemblées à rainures et languettes. Ces douves seront recouvertes de feuilles de tôle de 3/4 de millimètre d'épaisseur, retenues par des cercles en tôle.

La prise de vapeur sera celle des machines Crampton, en élevant, autant que possible, le tuyau fendu, et en faisant le joint contre la boîte du régulateur.

Les fentes devront être garnies de bords relevés, pour s'opposer le plus efficacement possible à l'entraînement de l'eau.

Les robinets réchauffeurs, de vidange, de retenue, des manomètres, seront conformes aux dessins remis aux constructeurs. Tous les boisseaux de robinets seront en bronze de 86 de cuivre pour 14 d'étain, et les clés, les écrous, les rondelles, en bronze de 90 de cuivre pour 10 d'étain.

La machine sera garnie d'un manomètre métallique à diaphragme Bourdon. A cet effet, la cuvette des soupapes portera un raccord semblable à celui employé actuellement dans les ateliers de la compagnie du Nord.

Les tubes seront en laiton avec soudure ou sans soudure, ils auront $0^m,002$ d'épaisseur sur $0^m,050$ de diamètre extérieur, et pèseront $3^k,09$ par mètre courant. Avant la pose, ils seront essayés à la presse hydraulique, à la pression de quarante atmosphères; ils seront espacés de $0^m,065$ d'axe en axe; il n'y aura des viroles que dans la boîte à feu; elles seront en acier de $0^m,0025$ d'épaisseur; elles présenteront comme les trous des plaques tubulaires une conicité de 1/40.

La cheminée ne pourra présenter aucune partie s'élevant au delà de $4^m,20$ au-dessus du rail; elle sera garnie du côté gauche d'une prise d'air pour modérer le tirage, et d'un capuchon en forme de 8, portant d'un côté une plaque et de l'autre une grille pour arrêter les flammèches.

Le pavillon du haut sera en cuivre rouge de $0^m,002$ d'épaisseur et le corps de la cheminée en bonne tôle puddlée de $0^m,004$.

Les cylindres seront en fonte grise dure, à grain serré; ils devront présenter des surfaces parfaitement rabotées dans les parties par lesquelles ils s'assemblent, soit avec les longerons, soit avec l'appendice de la boîte à fumée.

La masselotte de fusion sera au moins de $0^m,40$ de hauteur pour assurer la bonne qualité de la fonte.

Les tables des tiroirs seront rapportées, afin de faciliter les réparations; elles seront en bronze de 80 de cuivre pour 20 d'étain.

Les couvercles seront disposés de manière que le piston étant arrivé à la fin de sa course, il y ait un jeu absolu de $0^m,006$ en avant et $0^m,008$ en arrière.

Pour vérifier en service le maintien rigoureux de ce jeu aux fins de course, l'indication des fonds de cylindres sera portée sur les glissières par un trait parfaitement gravé, en correspondance avec un trait semblable sur l'axe transversal des coulisseaux.

Les tiges des pistons seront en acier fondu, les clavettes et les ressorts en général seront en acier fondu.

Les têtes de pistons seront en fer cémenté et trempé; elles seront garnies de coulisseaux rapportés en fonte de même nature que celles des cylindres, et montées sur tourillons.

Le boulon de connexion de la tête de bielle à la tête de piston est fixé dans la tête de piston.

Les glissières des têtes de pistons seront en acier fondu; elles s'assemblent d'un bout aux couvercles des cylindres, et de l'autre au support évidé, qui reçoit en même temps les pompes et l'axe de la pièce de suspension des tiges de tiroirs.

Chaque glissière supérieure portera deux godets graisseurs.

Le système de clavetage des bielles d'accouplement est disposé de telle sorte qu'un serrage égal des clavettes ne change pas la longueur des bielles.

Les têtes de bielles motrices et d'accouplement, le bouton de connexion et les têtes de clavettes seront cémentés et trempés en paquet.

Tous les tourillons et boulons d'articulation du mécanisme de transmission de mouvement aux tiroirs seront cémentés et trempés, de même que l'axe de rotation de cette pièce, venu avec la pièce.

La coulisse et les coulisseaux de détente variable seront également en fer cémenté et trempé.

Les œils de barres d'excentriques, ceux de la pièce de suspension des tiges de tiroirs, des tiges de suspension des coulisses, seront garnis de bagues en fer cémenté et trempé. Ces bagues seront posées à chaud, avec beaucoup de soin, trempées immédiatement, puis rodées.

Les colliers d'excentriques seront en bronze de 8¼ de cuivre pour 1 6 d'étain.

Les pompes alimentaires et leurs chapelles seront en fonte douce, grise.

Les boulets et les siéges seront en bronze de 8¼ de cuivre pour 1 6 d'étain.

Tous les tuyaux d'aspiration et de refoulement seront en cuivre rouge de $0^m,003$ d'épaisseur; la croisure des pinces sera égale à quatre fois l'épaisseur du cuivre; ces tuyaux seront essayés à la presse hydraulique, à une pression de 12 atmosphères, avant la pose.

Tous les raccords des tuyaux en général seront faits d'après les types remis au constructeur; ils seront en laiton de 90 de cuivre pour 10 de zinc.

Il y aura deux tuyaux réchauffeurs, indépendants; ils seront également en cuivre rouge, mais de $0^m,002$ d'épaisseur seulement; ils seront essayés à la presse hydraulique, avant la pose, avec une pression de 12 atmosphères.

La croisure sera toujours égale à quatre fois l'épaisseur.

Toutes les tôles de la caisse à eau et à coke proprement dite, excepté celles des fonds supérieur et inférieur, auront $0^m,003$ d'épaisseur, celle du fond supérieur aura $0^m,005$, celle du fond inférieur, $0^m,004$.

Tous les panneaux cintrés entrant dans la composition de la caisse à eau et à coke, ainsi que les coffres des caissons, seront en bonne tôle provenant de fonte au bois.

Les autres parties de la caisse pourront être en tôle puddlée provenant de fonte au coke.

Toutes les cornières proviendront de fonte au bois et seront de la meilleure qualité.

L'écartement des rivets sera de centre en centre de $0^m,03$, et le diamètre du rivet employé de $0^m,01$.

La réception définitive ne se fera qu'après un parcours effectué de 6 000 kilomètres en service ordinaire, lequel devra être fait dans un délai de quatre mois, sauf le cas de grandes réparations nécessitées par des vices de construction ou de matières.

**471.** *Poids des machines locomotives.* Pour des machines à 6 roues pour voyageurs, le poids de 21 tonnes, y compris le poids de l'eau et du coke, paraît convenable; l'essieu d'arrière, ou celui du milieu si les roues motrices sont à l'arrière, ne portent que 5 tonnes, celui d'avant 7 tonnes, et celui moteur 9 tonnes, y compris le poids des roues elles-mêmes; le poids des rails est supposé de 37 à 38 kil., et le nombre des traverses 4 pour une longueur de $4^m,50$. Pour le même chemin, les machines à marchandises peuvent peser 22 à 23 tonnes ou 25 à 26 tonnes, selon qu'elles sont à 4 ou à 6 roues accouplées, et que la charge est également répartie sur les deux essieux principaux dans le premier cas, et à peu près uniformément répartie dans le second. Ces machines peuvent encore voyager sur des rails de 30 kilog.; mais au-dessous de cette limite il faudrait ajouter une 5e traverse par rail. Les machines récentes, système Engerth, pèsent jusqu'à 64 tonnes; mais le poids est

réparti de manière que la charge de chaque paire de roues ne dépasse pas sensiblement 12 tonnes (page 617).

Des machines construites par M. Buddicom pour divers chemins, et entre autres celui du Havre, ne pèsent pas vides plus de 14850 kilog.

Les tenders doivent être aussi légers que possible; ceux du chemin de Rouen, pouvant contenir 3500 litres d'eau et une tonne de coke, ne pèsent pas vides plus de 4 tonnes.

Une machine-tender, dont le poids serait à peu près uniformément répartie sur les trois essieux pourrait peser jusqu'à 25 tonnes.

*TABLEAU des poids des diverses matières contenues dans la machine à voyageurs du chemin de fer du Nord*, d'après MM. Valerio et de Brouville.

| MATÉRIAUX. | CHASSIS et supports. | MÉCANISME. | CHAUDIÈRE. | TOTAL. |
|---|---|---|---|---|
| | k. | k. | k. | k. |
| Fonte. . . . . | 1237.0 | 2434.0 | 42.0 | 3713.0 |
| Fer forgé. . . . . | 4769.9 | 974.7 | 1625.4 | 7370.0 |
| Tôle. . . . . | 1322.5 | » | 2995.8 | 4318.3 |
| Acier. . . . . | 440.0 | 150.5 | 15.1 | 605 6 |
| Cuivre rouge. . . . . | » | 124·0 | 786 8 | 910.8 |
| Laiton. . . . . | 6.0 | 3 6 | 1437.5 | 1447.1 |
| Bronze. . . . . | 81.6 | 405.6 | 258.6 | 745.7 |
| Bois et divers. . . . . | 335.5 | 17.5 | 138.5 | 491.5 |
| Totaux. . . . | 8192.5 | 4109.9 | 7299.7 | 19602.1 |

**472.** *Prix des machines locomotives, voitures et wagons.* Le prix le plus habituel des machines locomotives varie de 2 fr. à 2 fr. 10 le kilog.

Cinq machines à marchandises, que M. C. Polonceau a fait construire ensemble dans les ateliers du chemin d'Orléans, et dont les dimensions sont données dans le tableau page 612, sont revenues à 47259 fr. pièce.

Une machine sans son tender coûte environ 50000 fr.; elle fait au maximum et en moyenne 20 000 kilom. par an, et après un parcours de 300 000 kilom., il est nécessaire de la remplacer ou de la reconstruire à neuf. Dans l'un ou l'autre de ces cas, la perte est d'environ 30 000 fr., déduction faite de la valeur des vieux matériaux vendus ou rentrant dans la construction nouvelle.

*TABLEAU du prix des locomotives, tenders, voitures et wagons.* (*Traité élémentaire des chemins de fer*; par M. Perdonnet.)

| | | |
|---|---|---|
| Locomotive | à voyageurs, système Stephenson. . . . . | 52000 fr. |
| *Id.* | à 4 roues couplées (au commencement de 1852). . . . | 41 950 |
| *Id.* | *id.* (fin de 1852). . . . . | 49500 |
| *Id.* | à marchandises (du poids de 24 tonnes). . . . . | 53000 |
| *Id.* | Crampton (au commencement de 1852). . . . . | 52000 |
| *Id.* | *id.* (1856). . . . . | 66000 |
| *Id.* | à marchandises (très-puiss. avec tender, modèle Sommering). . . . . | 115000 |

| | |
|---|---|
| Locomotive modèle Engerth | 107000 fr. |
| *Id.* Tender pour le service des gares (461 et 470) | 40000 |
| Tender de la machine Stephenson contenant 5e d'eau, pesant 8300 k. | 10800 |
| *Id.* *id.* Crampton cont. 6e d'eau pesant 10000 kil. | 13000 |
| Voiture de 1re classe (modèle de Strasbourg) | 11287 |
| *Id.* *id.* à coupé | 12000 |
| *Id.* de 2e classe, *id.* sans guérite | 5660 |
| *Id.* *id.* *id.* avec guérite et freins | 6680 |
| *Id.* mixte, *id.* *id.* | 8080 |
| *Id.* de 3e classe, *id.* sans guérite | 5225 |
| *Id.* *id.* *id.* avec guérite et freins | 6125 |
| Longueur de la caisse de 1re | 5m.50 |
| *Id.* de 2e | 5 .00 |
| *Id.* de 3e | 5 .75 |
| Wagon à bagages | 5595 fr. |
| *Id.* à bestiaux | 3935 |
| *Id.* à houille, pouvant porter 10 tonnes | 3740 |
| *Id.* plat à marchandises | 3250 |
| Truck à chaises de poste | 3500 |
| Wagons mixtes du Midi en bois de teack. Longueur de la caisse, 7 mètres; sans roues, ressorts, boîtes à graisse et plaques de garde | 11000 |
| Voitures de 1re classe d'Orléans en teack. Longueur, 6 mètres, sans roues, ressorts, boîtes à graisse | 12000 |
| Paire de roues montée (Strasbourg) pesant 750 kil. | 548 |

**473.** *Alimentation de la chaudière et du foyer.* Chaque machine est munie de deux pompes alimentaires dont chacune est capable de fournir autant et plus d'eau qu'en exige la vaporisation, afin que le mécanicien ait la faculté de maintenir à un point convenable le niveau de l'eau dans la chaudière (467 et 469). Un robinet permet de régler l'arrivée de l'eau aux pompes.

Un tube en verre placé en arrière, sur la boîte à feu, indique le niveau de l'eau. De l'eau seule devrait s'échapper en ouvrant le robinet indicateur placé le plus bas, c'est-à-dire à 0m,025 ou 0m,030 au-dessus du sommet de la boîte à feu. Le robinet du milieu devrait donner de l'eau seule pendant la marche, et de l'eau mélangée de vapeur dans les moments d'arrêt.

La consommation d'eau augmente avec la vitesse, non-seulement parce que la puissance de vaporisation augmente, mais aussi à cause de la plus grande quantité d'eau entraînée mécaniquement.

Des expériences faites en Angleterre ont donné les résultats suivants :

1re *Expérience.*

| | |
|---|---|
| Poids de la machine | 21678 kilog. |
| *Id.* du tender | 13253 |
| Charge totale | 136795 |

L'espace parcouru ayant été de 56717 mètres en une heure, et les rampes 0m,003 sur une partie du parcours, la dépense d'eau a été de 4643 litres, 1l,289 par seconde.

2e *Expérience.*

| | |
|---|---|
| Poids à remorquer. . . . . | 66935 kilog. |
| Charge totale. . . . . | 401 tonnes. |

A la vitesse de 58 kilom. à l'heure, la dépensé d'eau a été de 5 460 litres, 1l,516 par seconde.

Au retour, avec la même charge, la pente étant favorable au mouvement, la vitesse fut de 64 kilomètres, et la quantité d'eau consommée en 36 minutes fut de 2 943 litres, 1l,36 par seconde.

3e *Expérience.*

La charge totale est réduite à 72 tonnes.

La vitesse obtenue a été de 69 kilom. à l'heure, et la quantité d'eau dépensée pendant le même temps fut de 5380 litres, 1l,494 par seconde.

*Dimensions de la machine qui a servi à faire ces expériences.*

| | m. |
|---|---|
| Diamètre des cylindres. . . . . | 0,38 |
| Course des pistons. . . . . | 0,56 |
| Diamètre des roues motrices. . . . . | 1,676 |
| Surface de chauffe par la boite à feu. . . . . | 4,62 |
| Surface de chauffe par les tubes. . . . . | 68,56 |

Sur le chemin de Liverpool à Manchester, où les machines ont des dimensions moindres, la consommation d'eau est en moyenne de 2830 litres par heure, 0l,786 par seconde, à des vitesses de 61 à 63 kilomètres.

Proportions des machines à voyageurs sur ce chemin.

| | m. |
|---|---|
| Diamètre des cylindres. . . . . | 0,305 |
| Course des pistons. . . . . | 0,457 |
| Diamètre des roues motrices. . . . . | 1,523 |
| Surface de chauffe par la boite à feu. . . . . | 4,46 |
| Surface de chauffe par les tubes. . . . . | 42,55 |

Les dimensions des machines à marchandises ne diffèrent de ces dernières qu'en ce que le diamètre des cylindres est de 0m,33, et la course des pistons 0m,508. Ces machines à marchandises sont toutes à cylindres intérieurs, et les deux paires de roues de devant sont couplées.

Le chemin de Liverpool à Manchester est de niveau sur presque toute sa longueur; la plus forte pente est de 1m,5 pour une longueur de 6400 mètres. La charge des trains de voyageurs est de 35 tonnes, et celle des trains de marchandises de 100 tonnes; mais on fait souvent usage de deux machines pour remorquer des trains de marchandises de 200 et jusqu'à 240 tonnes. La consommation de combustible sur ce chemin n'est que de 4k,6 à 5k,06 par kilomètre pour les trains de voyageurs, et de 6k,95 pour les trains de marchandises; dans l'un et l'autre cas, la consommation est beaucoup plus élevée sur les autres lignes. La consommation de coke est habituellement aujourd'hui de 7 à 9 kilog.

Des expériences faites par M. Stephenson ont paru démontrer que pour faire mouvoir une machine et son tender à la vitesse ordinaire de

48 à 50 kilomètres, il faut autant de coke que pour faire mouvoir une charge de 15 voitures, c'est-à-dire que la consommation pour la machine et le tender, sans charge additionnelle, est la moitié de celle qui a lieu lorsque 15 voitures sont ajoutées à la machine (455).

L'alimentation du foyer doit être aussi régulière que possible, et faite de manière que le combustible soit en complète incandescence quand la dépense de vapeur doit être augmentée, ou encore quand le niveau de l eau est élevé dans la chaudière et que l'on peut supprimer l'action des pompes, que la vapeur s'échappe légèrement par les soupapes et que la machine voyage à une bonne vitesse.

L'intervalle de deux chargements successifs de coke est variable. Dans les pentes considérables et pour de fortes charges, on peut alimenter tous les 3 à 4 kilomètres; dans les cas contraires, on peut parcourir 24 à 25 kilomètres.

Le coke est mis au feu par le chauffeur à l'ordre du mécanicien, qui tient la chaîne de la porte du foyer pour refermer cette porte pendant que le chauffeur charge sa pelle. Celle-ci doit être bien remplie et le coke distribué également sur le foyer.

**474.** Le tableau suivant donne les *pertes de pression, en centimètres de hauteur d'eau, produites dans le foyer et dans la boîte à fumée*, pour des machines du chemin de fer du Nord, fonctionnant dans les conditions ordinaires du service.

| VITESSE en kilom. | NOMBRE de voitures. | OUVERTURE DU TUYAU D'ÉCHAPPEMENT en centimètres carrés. 110 à 90 — Boîte à fumée. | 110 à 90 — Foyer. | 90 à 70 — Boîte à fumée. | 90 à 70 — Foyer. | 70 à 50 — Boîte à fumée. | 70 à 50 — Foyer. | OBSERVATIONS. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 55 | 11<br>12 | 8.05 | 5.05 | 8.72 | 6.36 | 14.90 | 9.75 | Machine à voyageurs, système Stephenson. |
| 55 | 10<br>16 | 11.14 | 6.24 | 16.00 | 10.33 | 18.25 | 11.80 | Machine à voyageurs, système Clapeyron. |
| 22 | 33 | 9.62 | 6.70 | 10.10 | 6.9 | 12.40 | 8.54 | Machine à marchandises. |
| | | 210 à 240 — Boîte à fumée. | 210 à 240 — Foyer. | 140 à 100 — Boîte à fumée. | 140 à 100 — Foyer. | | | |
| 60 | 12 | 6.25 | 4.18 | 6.57 | 4.35 | | | Machine Crampton. |

**475.** *TABLEAU des dimensions principales de quelques machines locomobiles* (extrait du *Traité des machines à vapeur* de M. Gaudry).

| CONSTRUCTEURS. | Force nominale. | Pression dans la chaudière. | Détente (356). | PISTON. | | | TUBES. | | | Surface totale de chauffe. | GRILLE. | | CHEMINÉE. | | Nombre de roues. | Poids total, vide. | Prix. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Diamètre. | Course. | Tours par seconde. | Nombre. | Longueur. | Diamètre intérieur. | | Longueur. | Largeur. | Diamètre. | Hauteur. | | | |
| | chev. | atm. | | m. | m. | | (Chaudière cylindrique) | | | m. c. | (Diamètre 0m.65) | | m. | m. | | kil | fr. |
| Flaud, à Paris. . . . . | 2 | 5 | 0.5 | 0.10 | 0.12 | » | | | | 2.25 | | | » | » | 2 | 900 | 2500 |
| | | | | | | | | m. | m. | | m. | m. | | | | | |
| Nepveu, à Paris. . . . . | 3 | 5 | 0.7 | 0.14 | 0.20 | 80 | » | » | » | 5.40 | 0.35 | 0.55 | 0.18 | 3.00 | 2 | 1200 | 4500 |
| Cumming, à Orléans. . . . . | 3 | 6 | 0.9 | 0.12 | 0.20 | 150 | 37 | 1.00 | 0.05 | 6.50 | 0.50 | 0.60 | » | » | 2 | 1715 | 4000 |
| Renaud et A. Lotz, à Nantes. . . . . | 4 | 5 | » | 0.145 | 0,29 | 130 | » | » | » | 6.40 | 0.35 | 0.75 | 0.22 | 3.00 | 2 | 2300 | 4000 |
| Rouffet, à Paris.. . . . . | 4 | 5 | 0.33 | 0.65 | 0.30 | 80 | 12 | 1.83 | 0.06 | 5.30 | » | » | » | » | 4 | 2100 | » |
| Lotz aîné, à Nantes.. . . . . | 5 | 5 | 0.75 | 0.18 | 0.25 | 145 | 22 | 0.70 | 0.045 | » | 0.70 | 0.46 | » | » | 4 | 2300 | 4500 |
| Calla, à Paris. . . . . | 6 | 6 | » | 0.15 | 0.30 | 120 | » | » | » | » | » | » | 0.205 | 3.04 | 4 | 2800 | 6500 |
| Ramsome et Sims, à Ipswich.. . . . | 7 | 3.5 | » | 0.18 | 0.25 | » | » | » | » | 9.10 | 0.40 | 0.60 | 0.25 | 3.00 | 4 | » | » |
| Clayton, Anglais. . . . . | 8 | 3.5 | » | 0.20 | 0.30 | » | » | » | » | 8.00 | 0.30 | 0.55 | 0.24 | 2.20 | 4 | » | 4482 |
| Burrell, à Norfolk. . . . . | 8 | 3.5 | 0.5 | 0.228 | 0.345 | 85 | 32 | 1.89 | 0.067 | 10.00 | 0.456 | 0.812 | » | » | 2 | 2600 | 6250 |
| Gouin (plans de MM. Pérignon, Thomas et Laurens). . . . . | 10 | 7 | » | 0.25 | 0.30 | » | » | » | » | 6.00 | 0.50 | 0.70 | 0.23 | 2.80 | 4 | » | » |
| Calla, à Paris. . . . . | 15 | 6 | » | 0.25 | 0.36 | 95 | » | » | » | » | » | » | 0.23 | 4.05 | 4 | 5600 | 13000 |

476. *Dispositions relatives à l'emploi des machines à vapeur locomobiles et locomotives.* (Extrait des ordonnances des 22 et 23 mai 1843.) (312).

1° *Machines locomobiles.* Sont considérées comme locomobiles les machines à vapeur qui, pouvant être transportées facilement d'un lieu dans un autre, n'exigent aucune construction pour fonctionner à chaque station.

Les chaudières et autres pièces de ces machines sont soumises aux épreuves et aux conditions de sûreté prescrites pour les machines fixes (n^os^ 312, 313, 314, 316, 317 et 318), sauf les exceptions suivantes, pour celles de ces chaudières qui sont construites suivant un système tubulaire :

1° Lesdites chaudières peuvent être éprouvées sous la pression double seulement de la pression effective ;

2° On peut, quelle que soit la tension de la vapeur dans ces chaudières, remplacer le manomètre à air libre par un manomètre à air comprimé, ou même par un thermomanomètre, c'est-à-dire par un thermomètre gradué en atmosphères et parties décimales d'atmosphère : les indicateurs de ces instruments devront être parfaitement lisibles et en vue du chauffeur ;

3° On peut se dispenser d'adapter auxdites chaudières un flotteur d'alarme, et il suffira qu'elles soient munies d'un tube indicateur en verre convenablement placé.

Indépendamment des timbres relatifs aux conditions de sûreté (313), toute locomobile reçoit une plaque portant le nom du propriétaire.

Aucune locomobile ne peut fonctionner à moins de 100 mètres de distance de tout bâtiment sans une autorisation spéciale donnée par le maire de la commune. En cas de refus, la partie intéressée peut se pourvoir devant le préfet.

Si l'emploi d'une machine locomobile présente des dangers, soit parce qu'il n'aurait point été satisfait aux conditions de sûreté prescrites ci-dessus, soit parce que la machine n'aurait pas été entretenue en bon état de service, le préfet, sur le rapport de l'ingénieur des mines, ou, à son défaut, de l'ingénieur des ponts et chaussées, peut suspendre ou même interdire l'usage de cette machine.

2° *Machines locomotives.* Les machines à vapeur locomotives sont celles qui, en se déplaçant par leur propre force, servent au transport des voyageurs, des marchandises ou des matériaux.

Comme pour les machines locomobiles, les dispositions pour les machines fixes des n^os^ 312, 313, 314, 316, 317 et 318 sont applicables aux chaudières et autres pièces de ces machines, sauf l'exception suivante :

*Les soupapes de sûreté des machines locomotives peuvent être chargées au moyen de ressorts disposés de manière à faire connaître, en kilogrammes et en fractions décimales de kilogramme, la pression qu'ils exercent sur les soupapes.*

Aucune machine locomotive ne peut être mise en service sans un permis de circulation délivré par le préfet du département où se trouve le point de départ de la locomotive.

La demande du permis contient les indications comprises sous les 1° et 3° de la demande en autorisation des machines fixes (315), et fait connaître de plus le nom donné à la machine locomotive et le service auquel elle est destinée.

Le nom de la locomotive est gravé sur une plaque fixée à la chaudière.

Le préfet, après avoir pris l'avis de l'ingénieur des mines, ou, à son défaut, de l'ingénieur des ponts et chaussées, délivre, s'il y a lieu, le permis de circulation.

Dans ce permis sont énoncés :

1° Le nom de la locomotive et le service auquel elle est destinée ;
2° La pression maximum (en nombre d'atmosphères) de la vapeur dans la chaudière, et les numéros des timbres dont la chaudière et les cylindres auront été frappés ;
3° Le diamètre des soupapes de sûreté ;
4° La capacité de la chaudière ;
5° Le diamètre des cylindres et la course des pistons ;
6° Enfin, le nom du fabricant et l'année de la construction.

Si une machine locomotive ne satisfait pas aux conditions de sûreté ci-dessus prescrites, ou si elle n'est pas entretenue en bon état de service, le préfet, sur le rapport de l'ingénieur des mines, ou, à son défaut, de l'ingénieur des ponts et chaussées, peut en suspendre ou même en interdire l'usage.

Les conditions auxquelles est assujettie la circulation des locomotives et des convois, en tout ce qui peut concerner la sûreté publique, sont déterminées par arrêtés du préfet du département où est situé le lieu du départ, après avoir entendu les entrepreneurs, et en ayant égard tant au cahier des charges des entreprises qu'aux dispositions des règlements d'administration publique concernant les chemins de fer.

### FRAIS DE CONSTRUCTION ET D'EXPLOITATION DES CHEMINS DE FER.

**477.** *Considérations pécuniaires sur l'établissement d'un chemin de fer.* Lors de l'établissement d'un chemin de fer, on doit considérer :

1° Les frais de construction, représentés dans les frais d'exploitation par l'intérêt du capital ;
2° Les frais d'entretien du chemin ;
3° Les frais de traction ;
4° Les frais généraux.

**478.** *La dépense d'exécution d'un chemin de fer se divise comme il suit :*

1° Études ;
2° Acquisition des propriétés, indemnités pour dommages et dépréciations ;
3° Terrassements ;
4° Percements de souterrains ;
5° Ouvrages d'art (ponts, viaducs, aqueducs, murs de soutenement, murs de clô-clôture, etc) ;
6° Établissement de la voie (rails, coussinets, traverses, sable, croisement de voies, plaques tournantes, etc.) ;
7° Clôtures et barrières ;
8° Bâtiments pour les stations (stations principales, stations intermédiaires, remises pour locomotives et pour diligences, magasins, réservoirs) ;
9° Atelier de réparation avec outillage ;
10° Matériel pour l'exécution du chemin (wagons de terrassement, tomberaux, outils, hangars provisoires, etc.) ;
11° Matériel d'exploitation du chemin (locomotives, voitures de différentes espèces pour le transport des voyageurs, chariot pour le transport des marchandises et pour celui de animaux) ;
12° Approvisionnements en matières premières, telles que combustibles, métaux pour la réparation des locomotives et diligences ;
13° Frais d'administration (directeur, ingénieurs, conducteurs de travaux, gardes, caissier, dessinateurs, expéditionnaires, etc.) ;
14° Frais de contentieux (notaires, avocats, avoués, etc.) ;
15° Faux frais divers (publications, journaux) ;
16° Intérêt de l'argent pendant la durée de la construction ;
17° Frais imprévus pour accidents, articles oubliés, etc. (480).

**479.** *Devis pour la voie et le matériel d'un chemin de fer.* (Les nombres suivants sont en partie extraits du *Portefeuille des chemins de fer*, de MM. Perdonnet et Polonceau.)

M. Vuigner, ingénieur de la compagnie du chemin de fer de Paris à Strasbourg, établit le prix de revient du mètre courant de cette voie de la manière suivante :

| | fr. |
|---|---|
| Ballast ou fondation de la voie, $2^m,20$ de sable, gravier ou cailloux, à 3 fr. 60 c. le mètre cube. . . . . | 8,00 |
| $0^{mc},10$ de bois pour traverses, à 75 fr. le stère. . . . . | 7,50 |
| 75 kilog. de fer pour rails, à 360 fr. la tonne rendue sur la ligne. . . . | 27,00 |
| 20 kilog. de fonte pour coussinets, à 260 fr. la tonne rendue sur la ligne. | 5,20 |
| 1,05 kilog. de chevillettes, à 48 centimes. . . . . | 0,50 |
| 1,8 coins, à 17 fr. 50 c. le cent. . . . . | 0,32 |
| Déplacement de matériaux dans les chantiers de réception, etc. . . . . | 1,00 |
| Déplacement des chantiers à pied d'œuvre et pose. . . . . | 2,00 |
| Frais généraux pour prime dans les usines. . . . . | 0 98 |
| Total pour une simple voie. . . . . | 52,50 |
| Et pour une double voie. . . . . | 105,00 |

Il faut compter en outre pour voies accessoires dans les stations :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Le gares d'évitement, etc., 1/20 en sus. . . . . | 5 fr. | 25 c. | 11,00 |
| Changements et croisements de voies. . . . . | 2 | 75 | |
| Plates-formes tournantes. . . . . | 3 | 00 | |
| Total. . . . . | | | 116,00 |

M. Vuigner a pris, pour composer le prix de revient du mètre cou-

rant de voie, les prix élémentaires payés à la fin de l'année 1846 par la compagnie du chemin de fer de Paris à Strasbourg.

Il a admis le chiffre de 1/20 pour la longueur de voies d'évitement, garage, remisage, etc., et les chiffres de 2 fr. 75 c. et 3 fr. pour l'établissement des plaques tournantes et des changements de voies.

Sur les chemins de fer aux environs de Paris, les voies accessoires pour les gares d'évitement, l'exploitation des stations, le service des ateliers, etc., ont dépassé le dixième du développement des voies principales. Sur les chemins d'Orléans et de Rouen elles n'ont été que les 3/40.

On a pensé que 1/20 suffirait pour le chemin de Paris à Strasbourg, parce qu'à mesure que l'on s'éloigne de Paris, les stations non-seulement diminuent d'importance, mais encore sont plus espacées.

On peut diminuer la dépense des voies de remisage en employant pour ces voies, dans les remises de wagons, des rails de 15 à 20 kilog. au lieu de ceux de 37 kilog. dont on se sert pour les voies principales.

Les dépenses pour changements et croisements de voies, etc., et celles pour plates-formes tournantes, varient aussi en raison du nombre et de l'importance des stations.

Au chemin de fer d'Orléans, les changements et croisements de voies, etc., ont entraîné dans une dépense qui s'élève, pour chaque mètre courant de simple voie, à 2 fr. 70 c., et les plates-formes, à 3 fr. 43 c.

Si l'on a compté pour un chemin tel que celui de Paris à Strasbourg 2 fr. 75 c. pour les changements de voies et 3 fr. pour les plaques tournantes, bien que les stations y soient moins nombreuses et moins importantes que sur celui d'Orléans, cela tient à ce que les rails du chemin de Strasbourg sont d'environ 1/4 plus lourds que ceux du chemin d'Orléans, et les plaques tournantes sont de plus grande dimension.

Passant au *matériel d'exploitation*, M. Vuigner en établit le devis, pour le chemin de Paris à Strasbourg, comme il suit, en remarquant que le matériel comprend, savoir :

1° Les locomotives avec leurs tenders ;
2° Les voitures, wagons et trucks ;
3° Les grues hydrauliques et accessoires pour l'alimentation des machines ;
4° L'outillage des ateliers de réparation ;
5° Enfin, le mobilier des stations.

1° Les locomotives et les tenders forment un des articles les plus importants du matériel d'exploitation d'un chemin de fer.

*TABLEAU du nombre et du parcours annuel des locomotives de quelques chemins de fer.*

| DÉSIGNATION DES CHEMINS. | ANNÉES. | NOMBRE des locomotives. | PARCOURS MOYEN ANNUEL des machines | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | à voyageurs. | à marchand. | Ensemble. |
| | | | kilom. | kilom. | kilom. |
| Nord | 1849 | 196 | 19600 | 13500 | 17300 |
| Chemins belges | 1848 | 160 | » | » | 22400 |
| Saint-Germain et Versailles (rive droite) | 1849 | 32 | 13878 | » | 13878 |
| Paris à Orléans | 1849 | 75 | 14952 | 20570 | 16900 |
| Rouen et Havre | 1849 | 78 | 20524 | 24316 | 21885 |
| Orléans à Bordeaux | 1849-50 | 31 | » | » | 21817 |
| Strasbourg à Bâle | 1849 | 29 | » | » | 16093 |

Aujourd'hui on ne craint pas, dans quelques cas, de faire parcourir aux locomotives 150 à 200 et même 230 kilom. sans autres temps de repos que les arrêts aux stations; il y a à peine quelques années que cette limite semblait devoir être fixée à 120 kilom.

Sur la ligne d'Orléans, le *nombre moyen de voyageurs par train*, rapporté à la distance entière, était de 100 pour les années 1844 et 1845.

Sur le chemin de Strasbourg à Bâle, le nombre moyen de voyageurs par convoi, rapporté à la distance entière, a été de 51 pendant les mêmes années.

Comme il y avait sur ce dernier chemin des convois mixtes dans lesquels le nombre des voitures à voyageurs était réduit à 7,19, et que dans les convois spéciaux de voyageurs ce nombre de voitures était de 10,35, tandis que sur le chemin d'Orléans il était généralement de 10,55, le chiffre de la moyenne ci-dessus doit être porté à 60 voyageurs pour être dans les conditions proportionnelles à celles du chemin d'Orléans.

Le chemin de Paris à Strasbourg a été considéré comme présentant des conditions d'exploitation semblables, d'une part, à celles du chemin d'Orléans pour une certaine zone aux environs de Paris, et d'autre part, au chemin de Bâle pour une autre zone aux environs de Strasbourg.

*Quant aux marchandises*, le nombre moyen de tonnes par train spécial, rapporté à la distance entière, a été, pour le chemin de fer d'Orléans, en 1844, de 60 tonneaux, et de 67 en 1845.

Au chemin de Rouen, la moyenne était de 100 tonneaux environ pour les trains allant à Paris; mais comme au retour la moyenne n'é-

tait au maximum que de 20 tonneaux, la moyenne générale n'était en réalité que de 60 tonneaux.

On a admis pour le chemin de Strasbourg et ses embranchements une moyenne de 60 tonneaux.

La charge moyenne en voyageurs ou en marchandises étant également connue, on en déduit le nombre de convois nécessaire pour assurer le service, puis le parcours kilométrique des convois et celui des machines, et en divisant ce parcours kilométrique annuel de toutes les machines par celui d'une seule, on a le nombre des machines.

Ainsi, sur le chemin de Strasbourg et ses embranchements, on a compté sur un parcours annuel total de 1 970 339 kilom. pour les voyageurs, et sur celui de 18 000 kilom. par machine, ce qui a conduit au nombre de 110 locomotives (419).

2° *Voitures.* Sur le chemin d'Orléans il y avait une voiture pour 3270 kilomètres parcourus pour le service des voyageurs; sur le chemin de Rouen, ce chiffre était 2931; cela donne une moyenne de 3100.

L'application de cette moyenne au parcours (1 970 339 kilom.) des voyageurs, sur le chemin de Strasbourg et ses embranchements, conduit au chiffre de 630 pour le nombre total des voitures nécessaires.

Quant aux wagons et trucks pour le service des marchandises et le transport des chaises de poste, bestiaux, etc., leur nombre peut se déduire par approximation du nombre de locomotives. Sur les chemins d'Orléans et de Rouen, il y avait environ dix wagons pour une locomotive. On a adopté la même proportion pour le chemin de Strasbourg.

Le prix moyen des voitures de voyageurs étant de 7500 fr., et celui des wagons, trucks, etc., de 4 000 fr., la dépense du matériel des voitures revient, pour le chemin de Paris à Strasbourg, approximativement à 15 fr. par mètre courant de chemin de fer (472).

3°, 4° et 5°. La dépense relative aux grues hydrauliques et accessoires pour l'alimentation des machines, à l'outillage des ateliers de réparation et au mobilier des stations, toujours calculée sur les données fournies par les chemins en exploitation, s'élèverait à 5 fr. par mètre courant.

C'est largement compter que d'admettre 3 fr. pour le mètre courant de clôture (436 et 437).

Tels sont les éléments qui peuvent servir à établir le devis de la voie et du matériel d'un chemin de fer. Quoique recueillis avec soin, MM. Perdonnet et Polonceau conseillent néanmoins, pour éviter toute erreur, d'ajouter encore à l'ensemble du devis ainsi calculé un vingtième de somme à valoir.

PRIX DE L'OUTILLAGE DES ATELIERS D'ÉPERNAY, CHEMIN DE L'EST. (*Traité élémentaire des chemins de fer*, de M. Perdonnet.)

1° *Atelier d'ajustage.*

| | | |
|---|---|---|
| 2 | machines à vapeur de 25 chevaux. . . . . | 41 000 fr. |
| 2 | chaudières à vapeur. . . . . | 15 100 |
| 1 | machine à vapeur de 4 chevaux pour élever l'eau dans le réservoir. . . . . | 4 000 |
| 1 | tour à roues motrices des machines Crampton. . . . . | 20 000 |
| 2 | tours à roues motrices des machines ordinaires. . . . . | 33 000 |
| 2 | tours à petites roues de machines . . . . . | 22 800 |
| 5 | tours à roues de tenders et de wagons. . . . . | 43 000 |
| 2 | gros tours parallèles de 0m,50 de hauteur de pointes. . . . . | 22 000 |
| 2 | tours parallèles à fileter. . . . . | 7 100 |
| 1 | tour à recentrer les essieux. . . . . | 5 650 |
| 1 | tour sphérique. . . . . | 4 400 |
| 2 | tours parallèles à engrenage de 0m,42 de hauteur de pointes. | 5 500 |
| 2 | *Id.* *id.* de 0m,37 *id.* . | 4 500 |
| 1 | tour à fileter. . . . . | 1 000 |
| 3 | petits tours parallèles de 0m,20 de hauteur de pointes. . . . | 2 250 |
| 7 | tours simples. . . . . | 7 200 |
| 2 | tours simples à 4 poupées pour fileter les entretoises de foyer. | 2 500 |
| 1 | tour simple à fileter les entretoises et tourner les écrous. . . | 1 500 |
| 4 | tours simples à engrenages et à bancs de bois. . . . . | 2 750 |
| 1 | grande machine à raboter. Course, 3m,10; largeur, 1m,45. . | 8 000 |
| 1 | *Id.* *Id.* 3 ,00; *Id.* 0 ,50. . | 3 000 |
| 1 | *Id.* *Id.* 1 ,30; *Id.* 0 ,70. . | 2 000 |
| 2 | *Id.* *Id.* » ; *Id.* 0 ,50. . | 5 600 |
| 2 | *Id.* *Id.* 1 ,50; *Id.* 0 ,50. . | 4 800 |
| 1 | petite *Id.* *Id.* 0 ,25; *Id.* 0 ,24. . | 500 |
| 1 | grande limeuse Wittwerth. . . . . | 4 500 |
| 3 | petites limeuses. . . . . | 4 200 |
| 1 | grande machine à mortaiser. . . . . | 11 540 |
| 1 | moyenne *id.* . . . . . | 5 940 |
| 2 | petites *id.* . . . . . | 5 660 |
| 1 | machine à alaiser les trous des boutons des manivelles des roues motrices. . . . . | 3 880 |
| 1 | grande machine à tarauder. . . . . | 750 |
| 1 | petite *id.* . . . . . | 250 |
| 1 | machine à percer radiale. . . . . | 4 000 |
| 1 | *Id.* à colonne. . . . . | 750 |
| 1 | *Id.* les trous des rivets de bandages. . . . . | 500 |
| 7 | *Id.* montées sur les colonnes des ateliers. . . . | 7 400 |
| 5 | auges en fonte pour meules à repasser. . . . . | 1 250 |
| 1 | machine à essayer l'huile. . . . . | 500 |
| 1 | presse hydraulique à caler les roues. . . . . | 2 100 |
| 1 | scie circulaire. . . . . | 600 |
| 2 | marbres à dresser. . . . . | 1 020 |
| 1 | roue en bois pour tour. . . . . | 100 |
| 1 | machine à vérifier les balances à ressorts des soupapes de locomotives. . . . . | 450 |
| 70 | étaux d'ajusteurs. . . . . | 4 550 |
| 120 | mètres courants d'établis d'ajusteurs avec tiroirs. . . . . | 2 400 |
| 9 | plaques tournantes de 2 mètres de diamètre. . . . . | 4 950 |
| | Total de l'atelier d'ajustage. . . . . | 336 440 fr. |

2° *Atelier des bandages de roues et des forges.*

| | | |
|---|---|---|
| 2 | forges doubles à souder les bandages. . . . . | 1 300 fr. |
| 2 | forges simples. . . . . | 1 000 |
| 3 | enclumes. . . . . | 600 |
| 1 | grue en bois pour ces forges. . . . . | 250 |
| 1 | potence en fer. . . . . | 100 |
| 1 | four à chauffer les bandages droits. . . . . | 5 000 |
| 2 | fours circulaires à chauffer les bandages. . . . . | 4 000 |
| 1 | chariot à treuil pour ces fours. . . . . | 2 000 |
| 1 | grue en fonte. . . . . | 3 500 |
| 1 | machine à cintrer et mandriner les bandages. . . . . | 10 000 |
| 1 | cuve à refroidir les bandages. . . . . | 1 000 |
| 1 | gros marteau à pilon de 1 500 kilog. . . . . | 13 500 |
| 1 | chaudière et son fourneau pour ce marteau. . . . . | 5 000 |
| 1 | four à réchauffer. . . . . | 2 000 |
| 1 | marteau-pilon de 250 kilog. . . . . | 4 600 |
| 1 | *Id.* de 80 kilog. . . . . | 2 400 |
| 10 | forges maréchales doubles. . . . . | 6 500 |
| 20 | enclumes de chacune 175 kilog. . . . . | 1 500 |
| 3 | étaux à chaud (150 kilog.). . . . . | 675 |
| 10 | potences en fer . . . . . | 1 000 |
| 6 | soufflets en cuir. . . . . | 900 |
| 1 | grue en bois et fer. . . . . | 250 |
| 1 | ventilateur. . . . . | 750 |
| | Total de l'atelier des bandages et des forges. . . . . | 67 825 |

3° *Atelier des ressorts et chaudronnerie.*

| | | |
|---|---|---|
| 5 | forges doubles. . . . . | 3 250 |
| 2 | forges simples. . . . . | 1 000 |
| 12 | enclumes (150 kilog.). . . . . | 1 800 |
| 2 | étaux à chaud (400 kilog.). . . . . | 560 |
| 20 | étaux d'ajusteurs (50 kilog.). . . . . | 1 280 |
| 4 | marbres en fonte à dresser. . . . . | 750 |
| 1 | machine à cintrer les ressorts. . . . . | 835 |
| 1 | laminoir à ressorts. . . . . | 1 600 |
| 1 | machine à couper les tôles. . . . . | 3 600 |
| 1 | machine à percer les tôles. . . . . | 3 800 |
| 2 | grosses meules à aiguiser. . . . . | 1 000 |
| 1 | presse à essayer les tubes en laiton. . . . . | 175 |
| | Cuves et fourneaux à nettoyer et sécher les tubes. . . . . | 600 |
| 6 | soufflets en cuir. . . . . | 900 |
| 1 | ventilateur. . . . . | 700 |
| 20 | mètres d'établis en bois avec tiroirs. . . . . | 350 |
| | Total de l'atelier des ressorts et chaudronnerie. . . . . | 25 200 fr. |

4° *Atelier de montage des locomotives et tenders.*

| | | |
|---|---|---|
| 2 | chariots roulants pour locomotives. . . . . | 5 000 |
| 1 | chariot roulant pour tenders. . . . . | 2 000 |
| | *A reporter*. . . . . | 7 000 fr. |

| | |
|---|---|
| *Report*. . . . . | 7000 fr. |
| 2 grues roulantes de montage. . . . . | 10000 |
| 1 grande grue à lever les machines et tenders. . . . . | 12500 |
| 170 étaux d'ajusteurs. . . . . | 11050 |
| 300 mètres courants d'établis et 200 tiroirs avec serrures. . . . | 6000 |
| Total de l'atelier de montage. . . . . | 46550 |
| Total général. . . . . | 476015 fr. |

Ce total ne comprend que l'acquisition des outils; il faudrait ajouter environ 16 pour 100 pour l'installation, comprenant les transmissions de mouvement, les fondations et la pose des outils (76 160 fr.).

Les voies de fer, grandes plaques tournantes et cheminées des machines à vapeur ne sont pas comprises dans cette dépense.

Pour compléter l'outillage des ateliers d'Épernay, il faudrait ajouter :

| | |
|---|---|
| 1 marteau-pilon de 90 kilog. . . . . | 2400 |
| 1 *Id.* de 500 kilog. . . . . | 6000 |
| 2 grosses forges pour les divers marteaux. . . . . | 3000 |
| 1 machine radiale. . . . . | 4500 |
| 1 machine à aléser les cylindres. . . . . | 4500 |
| 3 ou 4 petits tours. . . . . | 5000 |
| Total. . . . . | 25400 fr. |

*Outillage de l'atelier de Montigny.*

| | |
|---|---|
| 1° *Atelier d'ajustage*. . . . . | 126298 fr. |
| 2° *Forges et montage*. . . . . | 28750 |
| 3° Atelier des wagons. . . . . | 15320 |
| Total. . . . . | 170368 |
| Il faudrait, comme pour l'atelier d'Épernay, ajouter 16 p. 100 pour l'installation. . . . . | 27260 |
| Pour compléter l'outillage, il faudrait encore dépenser. . . . | 16550 |

| | |
|---|---|
| *Outillage de l'atelier de la Villette et carrosserie.* Total. . . . | 125795 |
| 16 pour 100 pour l'installation, soit. . . . . | 20000 |
| Pour compléter l'outillage. . . . . | 21900 |

**480.** *TABLEAU des dépenses moyennes de premier établissement des chemins de fer français, matériel compris, et des recettes brutes annuelles, par kilomètre* (*Traité élémentaire des chemins de fer* de M. Perdonnet).

| COMPAGNIES. | PARCOURS DES CHEMINS. | LONGUEUR des chemins terminés. | | DISTANCE moyenne des stations. | FRAIS d'établissement par kilomètre. | RECETTE brute par kilomètre. | DATE | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Une voie. | Deux voies. | | | | de l'exercice. | de l'ouverture entière. |
| | | kilom. | kilom. | kilom. | fr. | fr. | | |
| Nord. | Chemin de ceinture autour de Paris. . . . . | » | 17 | 1.31 | 11 500 000[1] | 39 400 | 1854 | 1853 |
| | Paris à la frontière par Lille et Valenciennes. . . . . | » | 338 | 8.33 | 444 000 | 56 000 | 1854 | 1846 |
| | Lille à Dunkerque et Calais. . . | » | 145 | » | 264 000 | | | 1848 |
| | Amiens à Boulogne. . . . . | » | 124 | » | 300 000 | | | 1850 |
| | Creil à Saint-Quentin. . . . . | » | 102 | » | 240 000 | | | 1857 |
| Ouest-Nord-Ouest. | Paris au Pecq. . . . . | » | 18.05 | 3.70 | 1 081 100 | 70 400 | 1854 | 1847 |
| | Vésinet à Saint-Germain (atmosphérique). . . . . | 2.5 | » | 2.50 | 2 517 000 | | | 1851 |
| | Asnières à Argenteuil. . . . . | 4.5 | » | 2.25 | 97 000 | | | 1854 |
| | Paris à Auteuil. . . . . | » | 8.01 | 1.35 | 432 000 | | | » |
| | Paris à Rouen . . . . . | » | 140 | 8.12 | 484 000 | 81 500 | 1854 | 1843 |
| | Rouen au Havre . . . . . | » | 92 | 7.66 | 634 000 | 54 000 | 1853 | 1847 |
| | Rouen à Dieppe . . . . . | » | 50 | 10.00 | 281 800 | 16 855 | 1855[2] | 1848 |
| | Paris à Versailles (rive droite). . | » | 19 | 2.71 | 872 800 | 81 600 | 1851 | 1839 |
| | *Id.* (rive gauche). . | » | 17 | 2.43 | 1 015 000 | 50 000 | 1852 | 1840 |
| Orléans. | Paris, Orléans et Corbeil. . . . | » | 133 | 5.54 | 460 000 | 82 300 | 1853 | 1843 |
| | Orléans à Bordeaux, par Tours. | » | 461 | 8.40 | 328 000 | 37 634 | 1854 | 1853 |
| | Tours à Nantes. . . . . | » | 194 | 6.50 | 420 000 | | | 1851 |
| | Centre, Clermont et Limoges. . | » | 320 | » | 313 000 | | | 1854 |
| Est. | Paris à Strasbourg. . . . . | » | 502 | 8.23 | 427 000 | 43 300 | 1854 | 1852 |
| | Frouard à Metz et Forbach. . . | » | 122 | 7.62 | 278 000 | | | 1852 |
| | Metz à Thionville. . . . . | » | » | 6.00 | 224 000 | | | 1854 |
| | Épernay à Reims. . . . . | 30 | » | 7.50 | 317 000 | | | 1854 |
| | Strasbourg à Wissembourg. . . | » | » | » | 217 240 | » | » | » |
| | Strasbourg à Bâle. . . . . | » | 135 | 4.86 | 310 000 | 24 500 | 1854 | 1841 |
| | Mulhouse à Thann. . . . . | 20 | » | 5.25 | 143 500 | 14 000 | 1854 | 1839 |
| | Blesmes à Gray. . . . . | 17 | » | » | » | 11 400 | 1854 | 1854 |
| | Montereau à Troyes. . . . . | 100 | » | 7.70 | 221 100 | 14 700 | 1854 | 1848 |
| Midi. . | Bordeaux à la Teste. . . . . | 52 | » | 4.73 | 115 000 | 4 900 | 1853 | 1842 |
| Orsay. | Paris à Sceaux. . . . . | 11 | » | 3.25 | 520 000 | 30 100 | 1853 | 1846 |
| Lyon.. | Paris à Lyon. . . . . | » | 508 | 8.76 | 563 000 | 58 500 | 1854 | 1854 |
| Grand-Central. | Lyon à Saint-Étienne. . . . . | » | 57 | 4.07 | 454 800 | 93 200 | 1852 | 1832 |
| | Saint-Étienne à Andrésieux. . . | 18 | » | 5.66 | 115 900 | 25 300 | 1852 | 1827 |
| | Andrésieux à Roanne. . . . . | 68 | » | 7.55 | 198 000 | 16 000 | 1852 | 1833 |
| | Lyon à la Méditerranée. . . . . | » | 125 | 6.25 | 445 000 | » | » | 1855 |
| | Avignon à Marseille. . . . . | » | 122 | 7.50 | 744 000 | 41 800 | 1853 | 1849 |
| | Beaucaire à Nîmes et Alais. . . | 64 | 28 | 5.41 | 210 800 | 23 800 | 1851 | 1840 |
| | Nîmes à Montpellier. . . . . | » | 52 | 3.27 | 290 000 | 20 000 | 1852 | 1845 |
| | Montpellier à Cette. . . . . | 27 | » | 6.75 | 183 300 | 18 000 | 1850 | 1852 |

[1] Non compris le matériel fourni par la compagnie.

[2] Cette compagnie ne possédait pas de matériel roulant.

*Division de la dépense d'établissement, par kilomètre, du chemin de Paris à Strasbourg, long de 502 kilomètres, et ouvert de 1849 à 1852.*

| | | |
|---|---|---|
| I. *Frais généraux*. . . | Études, charges de la concession, administration centrale. Direction et conduite des travaux. Frais divers. . . . . | 17150 fr. |
| II. *Terrains*. . . . . | Acquisition. . . . . | 55220 |
| | Frais accessoires, indemnités, frais judiciaires. | 2210 |
| III. *Terrassements*. . . . . | | 66380 |
| IV. *Ouvrages d'art*. . . | Ouvrages d'art courants. . . . . | 23390 |
| | Ponts sur rivières navigables. . . . . | 6390 |
| | Viaducs. . . . . | 4340 |
| | Souterrains. . . . . | 20040 |
| V. *Clôtures du chemin*. | Clôtures sèches et vives. . . . . | 3050 |
| | Maisons de gardes et de cantonniers. . . . . | 1460 |
| | Passages à niveau. . . . . | 1130 |
| VI. *Bâtiments*. . . . . | Gares et stations. . . . . | 20630 |
| | Ateliers et remises du matériel. . . . . | 11160 |
| VII. *Mobilier*. . . . . | Mobilier des gares et stations. . . . . | 1560 |
| | Outillage des ateliers et dépôts. . . . . | 1390 |
| VIII. *Voie de fer*. . . . | Ballast, non compris l'entretien pendant les premières années. . . . . | 23840 |
| | Rails, coussinets, chevillettes, traverses, etc. . . | 88730 |
| | Pose de la voie. . . . . | 7420 |
| IX. *Accessoires de la voie*. . . . . | Plaques tournantes. . . . . | 3700 |
| | Changements et croisements de voie. . . . . | 1070 |
| | Signaux fixes. . . . . | 530 |
| | Outillage de la voie. . . . . | 160 |
| X. *Alimentation des machines*. . . . | Machines à vapeur et pompes à bras. . . . . | 270 |
| | Grues hydrauliques. Réservoirs, tuyaux et prises d'eau. . . . . | 1650 |
| XI. *Télégraphe électrique* (poteaux et fils des appareils). . . . . | | 310 |
| XII. *Matériel roulant*. . | Machines, locomotives et tenders. . . . . | 25540 |
| | Voitures et wagons. . . . . | 26230 |
| XIII. *Dépenses non classées*. . . . . | | 20200 |
| XIV. *Intérêts payés pendant la construction*. . . . . | | 21500 |
| XV. *Approvisionnement et fonds de roulement*. . . . . | | 1000 |
| Total. . . . . | | 457650 fr. |

*TABLEAU des dépenses moyennes de premier établissement des chemins de fer dans les différents États, matériel compris, par kilomètre.*

| | |
|---|---|
| France, fin de 1853, pour une longueur exploitée de 4 000 kilomètres. . . | 390 000 fr. |
| Angleterre, année 1854, pour une longueur exploitée de 11 425 kilom. . | 530 000 |
| Belgique, fin de 1852, pour 625 kilom. construits par l'État, et non compris 279 kilom. établis par les compagnies. . . . . | 270 000 |
| Allemagne, fin de 1852, pour 6 651 kilom. à une voie et 1 624 kilom. à deux voies. . . . . | 201 000 |
| États-Unis, année 1853, pour 28 513 kilom. entièrement à une voie. . | 96 500 |

*Chemins exceptionnels.*

| | |
|---|---|
| Petits chemins établis autour des mines ou dans les mines, à Saint-Étienne, Épinac, etc. (poids du mètre de longueur du rail, 7 à 8 kilog.). . . . . 5 000 à | 10 000 |
| Chemin de Montron à Montbrison, établi à une voie sur l'accotement de la route impériale, et desservi par des chevaux. . . . . | 15 000 |
| Chemin de Denain, à une voie, établi à la surface pour le service des mines, et desservi par des chevaux. . . . . | 22 000 |
| Chemin de Paris à Versailles, rive gauche. . . . . | 1 015 000 |
| *Id.* atmosphérique de Saint-Germain. . . . . | 2 517 000 |
| *Id.* de Londres à Greenwich, 6 kilom. établis sur arcades et en grande partie dans l'intérieur de Londres. . . . . | 4 139 000 |
| *Id.* de Londres à Blackwall, 8 kilomètres établis dans l'intérieur de la ville. . . . . | 5 474 000 |

*Canaux.*

| | |
|---|---|
| Les canaux anglais, pour la plupart à petite section, et ne pouvant porter que des bateaux dont la charge dépasse rarement 60 tonneaux, ont coûté moyennement. . . . . | 145 000 |
| Les canaux français, généralement à grande section, pour bateaux chargeant de 100 à 150 tonneaux, ont coûté en moyenne. . . . . | 125 000 |
| Canal de Briare, à petite section. . . . . | 116 500 |
| *Id.* du Centre, à moyenne section, bateaux chargeant de 60 à 80 tonneaux. | 120 000 |
| *Id.* du Languedoc, à grande section. . . . . | 137 500 |
| *Id.* de Saint-Quentin, à grande section. . . . . | 135 000 |

*Routes.*

| | |
|---|---|
| Routes impériales non pavées. . . . . | 37 500 |
| *Id.* pavées. . . . . | 62 500 |

**481.** *Différents modes de traiter d'une compagnie avec les entrepreneurs.*

1° *Mode à forfait.* Un entrepreneur s'engage à construire toute la voie, ou simplement une partie, cas qui oblige de traiter avec plusieurs entrepreneurs, pour une somme déterminée. Les inconvénients de ce mode de traiter sont que les entrepreneurs font fortune ou faillite, et qu'on ne peut pas modifier les plans pendant l'exécution.

2° *Mode par série de prix.* Un ou plusieurs grands entrepreneurs, ou un grand nombre de petits entrepreneurs, s'engagent à construire la voie à raison de tant par mètre de chaque espèce d'ouvrage. C'est le meilleur mode de traiter, aussi l'emploie-

t-on généralement en France. Il vaut mieux traiter avec les grands entrepreneurs qu'avec les tâcherons.

3° *Mode en régie.* La compagnie fait exécuter elle-même ses travaux, et elle paye ses employés et ses ouvriers; c'est le mode le plus dispendieux, mais il permet d'accélérer, autant qu'il est possible, l'exécution des travaux. Il y a du reste des travaux dont on ne peut évaluer d'avance la valeur, et que l'on est obligé de faire exécuter de cette manière.

4° *Mode en régie intéressée.* La compagnie laisse aux directeurs de chantiers une partie de l'économie faite sur l'exécution des travaux, au-dessous des prix portés aux devis; c'est le mode qui offre le moins de garantie d'une bonne exécution des travaux.

**482.** *TABLEAU des frais d'entretien annuel, par kilomètre, des chemins de fer, canaux et routes.*

| | | fr. |
|---|---|---|
| Chemins anglais desservis par des chevaux (transit de 100 000 tonneaux). . . | | 560 |
| Pour les chemins français desservis par des chevaux (transit de 100 000 tonn.). | | 340 |
| Chemin de fer de Saint-Germain (vitesse moyenne, 8 9 lieues à l'heure; circulation annuelle, 1 500 000 voyageurs, représentant 500 000 tonnes, poids bruts). . . . . | 1er mois. . . . . | 4250 |
| | mois suivants. . . . | 4000 |
| Canal du Centre (mal entretenu). . . . . | | 900 |
| *Id.* de Briare. . . . . | | 1600 |
| *Id.* de Languedoc. . . . . | | 2100 |
| Canal de grande jonction. . . . . | | 4000 |
| *Id.* de Kennet et Avon. . . . . | | 2600 |
| *Id.* de Leeds à Liverpool. . . . . | | 2300 |
| Routes françaises départementales. . . . . | | 200 à 250 |
| *Id.* *Id.* impériales. . . . . | | 500 |
| *Id.* anglaises, 875 à 1000 et même. . . . . | | 1125 |

*TABLEAU des dépenses d'entretien, par kilomètre de longueur, de la voie de fer, des ouvrages et des bâtiments des stations en* 1850 (*Chemins de fer d'Angleterre*, par M. Le Chatelier).

| CHEMINS. | LONGUEUR entretenue. | ENTRETIEN. | RENOUVELLEMENT. de la voie. | TOTAL. |
|---|---|---|---|---|
| | kilom. | fr. | fr. | fr. |
| Londres, Brighton et South-Coast. . . . . | 144.2 | 2295.96 | 533.78 | 2829.74 |
| Lancashire et Yorkshire. . . . | 327.4 | 3024.50 | 453.10 | 3477.70 |
| East-Lancashire. . . . . | 127.1 | 1890.90 | 49.60 | 1940.50 |
| South-Eastern. . . . . | 394.2 | 1677.60 | 467.90 | 2145.50 |
| Midland (*a*). . . . . | 799.7 | 1878.40 | 413.10 | 2291.50 |
| Eastern-Counties. . . . . | 518.1 | 1871.10 | 834.40 | 2705.50 |
| Londres et North-Western (*b*). . | 769.1 | 3017.20 | 696.60 | 3713.80 |

(*a*) L'entretien du télégraphe électrique a coûté en outre 11 fr. par kilomètre.
(*b*) *Id.* 35 fr. 50 *id.*

**483.** *Prix du transport d'une tonne à 1 kilomètre, sur chemins de fer et canaux.*

| | fr. |
|---|---|
| Chemins de Roanne et de Saint-Étienne, vitesse 16 kil. environ (combustible, chauffeurs, service des pompes, graissage, réparation des machines et wagons). . . . | 0,0423 |
| Canal de Mons à Condé (retour avec moitié charge). . . . | 0,015 |
| *Id.* de Saint-Quentin (retour à vide). . . . . | 0,020 |
| *Id.* de Givors (retour avec charge complète). . . . . | 0,016 |
| *Id.* *Id.* (retour à moitié charge). . . . . | 0,024 |
| *Id.* de Languedoc. . . . . | 0,017 |
| *Id.* du Centre. . . . . | 0,028 |
| *Id.* de Briare. . . . . | 0,030 |

Quoique les frais de bateaux soient compris dans ces résultats, en séparant les frais de wagons, qui s'élèvent à 0f,0120, de ceux de traction sur les chemins de fer, la dépense est encore un peu moins forte pour les canaux que pour les chemins de fer.

Les frais de traction par kilomètre parcouru par une locomotive, d'après le relevé fait en 1849 sur plusieurs chemins français, peuvent se diviser ainsi qu'il suit (*Guide du mécanicien*).

| | fr. | | fr. |
|---|---|---|---|
| Frais de régie. . . . . | 0,05 | à | 0,06 |
| Personnel des dépôts. . . . . | 0,06 | à | 0,07 |
| Mécaniciens et chauffeurs. . . . . | 0,18 | à | 0,20 |
| Combustible. . . . . | 0,40 | à | 0,50 |
| Graissage et nettoyage . . . . . | 0,02 | à | 0,025 |
| Eau. . . . . | 0,02 | à | 0,02 |
| Dépenses diverses. . . . . | 0,02 | à | 0,025 |
| Entretien des machines et tenders. . . . . | 0,35 | à | 0,40 |
| Total. . . . . | 1,10 | à | 1,30 |

Ce qui fait une moyenne de 1f.20. Le parcours des locomotives étant de 1/10 plus élevé que celui des convois, cela porte le prix par kilomètre parcouru par le convoi à 1f,32.

# CINQUIÈME PARTIE.

## Architecture.

---

### ORDRES D'ARCHITECTURE.

**484.** *Module.* Pour comparer entre elles les dimensions des différentes parties d'un même ordre d'architecture, on prend pour unité le demi-diamètre de la colonne, que l'on appelle *module*. Le module se divise en vingt-quatre parties pour le dorique grec, le toscan et le dorique romain, et en trente-six parties pour les trois ordres élevés.

*Observations relatives aux tableaux suivants.* Nous avons réuni, planche première, les cinq ordres de Vignole, et nous y avons joint le dorique imité des Grecs. Ce dernier est plus généralement employé sans piédestal; le fût de la colonne repose directement sur des marches remplaçant la plinthe qui sert de base à la colonne quand il y a un piédestal.

Dans les tableaux suivants, qui renferment les proportions des différentes moulures et membres de moulures qui composent chaque ordre, on va toujours de la partie supérieure de l'ordre à la partie inférieure.

Le nu du mur qui surmonte l'ordre, celui de l'architrave, du gorgerin et du fût à sa partie supérieure, se trouvant sur le même aplomb, c'est-à-dire faisant une égale saillie sur l'axe de la colonne, dans les tableaux suivants, les saillies de l'entablement et du chapiteau sont comptées à partir de ces nus, dont la saillie sur l'axe pour les ordres :

| Dorique grec, | Toscan, | Dorique romain, | Ionique, | Corinthien, | Composite, |
|---|---|---|---|---|---|
| est respectivement : | | | | | |
| 18,2 part. | 19 part. | 20 part. | 30 part. | 30 part. | 30 part. |

Pour la base de la colonne, les saillies sont comptées à partir du nu de la partie inférieure du fût. La saillie de ce nu, sur l'axe de la colonne, est de un module dans tous les ordres.

Les saillies du piédestal sont comptées à partir du nu du dé. Ce nu se trouve à l'aplomb de la plinthe et du tore inférieur de la base de la colonne; sa saillie sur l'axe de la colonne est respectivement, pour les ordres précédents :

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 m. 3,73 p. | 1 m. 9 p. | 1 m. 10 p. | 1 m. 14 p. | 1 m. 14 p. | 1 m. 14 p. |

*TABLEAU des proportions des différentes moulures et membres de moulures qui composent les différents ordres.*

## DORIQUE IMITÉ DES GRECS, 19 M.

| MEMBRES DE MOULURES qui composent l'ordre. | | HAUTEUR. Mod. | Part. | SAILLIE. Mod. | Part. |
|---|---|---|---|---|---|
| **ENTABLEMENT, 4 m. 8 p.** | | | | | |
| *Corniche, 1 m. 2 p.* | Réglet | | 2.6 | 1 | 4.6 |
| | Quart de rond | | 5.2 | 1 | 4.6 |
| | Listel | | 1.3 | 1 | |
| | Petit quart de rond | | 1.3 | 1 | |
| | Filet | | 0.65 | | 22.75 |
| | Larmier | | 9.75 | | 22.10 |
| | Listel | | 1.3 | | 18.85 |
| | Mutules | | 2.6 | | 18.2 |
| | Gouttes | | 1.3 | | 18.2 |
| *Archit., Frise, 1 m. 15 p. 1 m. 15 p.* | Petite baguette | | 0.65 | | 2.6 |
| | Hauteur du bandeau, 3.25. | | | | 0.65 |
| | Chapeaux des triglyphes | | 4.55 | | 1.95 |
| | Triglyphes | 1 | 9.8 | | 1.63 |
| | Face de la frise | | | 0 | 0 |
| | Listel | | 2.6 | | 1.95 |
| | Haut. des chap. des gouttes, 2.6. Hauteur des gouttes, 1.3. | | | | 1.63 |
| | Face de l'architrave | 1 | 12.4 | | 1.63 |
| **COLONNE, 11 m. 8 p.** | | | | | |
| *Chapiteau, 18.85 p.* | Tailloir | | 9.1 | | 9.1 |
| | Quart de rond. — A la plus grande saillie | | .7.8 | | 9.1 |
| | Quart de rond. — Au bas | | | | 2.6 |
| | Annelets. — Filet supér. | | .1.95 | | 2.6 |
| | Annelets. — Filet infér. | | | | 0.65 |
| | Ce sont quatre petits filets séparés entre eux par un refouillement égal à leur hauteur. | | | | |
| *Fût, 10 m. 5.15 p.* | Partie comprise entre les annelets et la rainure | | 5.2 | 0 | 0 |
| | Rainure | | 0.65 | | |
| | Fût | 9 | 25.3 | 0 | 0 |
| *Base, 8 p.* | Plinthe, ou marche continue sous le fût | | 8 | | 3.73 |
| **PIÉDESTAL, 3 m. 8 p.** | | | | | |
| *Corn., 10.4 p.* | Réglet | | 1.7 | | 6.06 |
| | Larmier | | 5.2 | | 5.2 |
| | Talon. — Plus gr. saillie | | .3.5 | | 2.6 |
| | Talon. — Au bas | | | | 0.65 |
| *Dé, 2 m. 9.9 p.* | Dé | 2 | 6.4 | 0 | 0 |
| | Congé | | 3.5 | | 3.5 |
| *Base, 11.7 p.* | Premier socle | | 3.9 | | 3.5 |
| | Deuxième socle | | 7.8 | | 4.33 |

## TOSCAN, 22 M. 4 P.

| MEMBRES DE MOULURES qui composent l'ordre. | | | HAUTEUR. Mod. | Part. | SAILLIE. Mod. | Part. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **ENTABLEMENT, 3 m. 12 p.** | | | | | | |
| *Corniche, 1 m. 8 p.* | Cimaise supérieure | Quart de rond | 8 | | 1 | 12 |
| | | Baguette | 2 | | 1 | 5 |
| | | Filet | 1 | | 1 | 4 |
| | Larmier | Congé | 2 | | 1 | 2 |
| | | Larmier | 10 | | 1 | 2 |
| | | Profond. de la mouchette, 1 p. | | | | |
| | | Filet | 1 | | | 9 |
| | Cimaise infér. | Talon — En haut | | .8. | | 8 |
| | | Talon — En bas | | | | 1 |
| *Frise*, 1 m. 4 p. | | | 1 | 4 | 0 | 0 |
| *Archit.*, 1 m. | Filet | Listel | 4 | | | 4 |
| | Plate-bande | Congé | 4 | | | 4 |
| | | Face | 16 | | 0 | 0 |
| **COLONNE, 14 m.** | | | | | | |
| *Chapiteau, 1 m.* | Tailloir | Filet | 2 | | | 10 |
| | | Congé | 2 | | | 8 |
| | | Larmier | 4 | | | 8 |
| | Cimaise | Quart de rond | 6 | | | 7.5 |
| | | Filet | 2 | | | 2 |
| | Gorgerin | Congé | 2 | | | 2 |
| | | Part. cylindr. | 6 | | 0 | 0 |
| *Fût, 12 m.* | Astragale | Baguette | 2 | | | 3 |
| | | Filet | 1 | | | 2 |
| | Fût | Congé supér. | 2 | | | 2 |
| | | Fût | 11 | 16 | 0 | 0 |
| | | Congé infér. | 3 | | | 3 |
| *Base, 1 m.* | Filet | | 2 | | | 3 |
| | Tore | | 10 | | | 9 |
| | Plinthe | | 12 | | | 9 |
| **PIÉDESTAL, 4 m. 16 p.** | | | | | | |
| *Corn., 12 p.* | Cimaise | Listel | 4 | | | 8 |
| | Talon | En haut | | .8. | | 7 |
| | | En bas | | | | 1 |
| *Dé, 3 m. 16 p.* | Socle | | 3 | 12 | 0 | 0 |
| | Congé | | 4 | | | 4 |
| *Base, 12 p.* | Filet | | 2 | | | 4 |
| | Socle | | 10 | | | 8 |

Le revers d'eau qui empêche l'eau de séjourner sur la corniche de l'entablement a 4 parties de hauteur.

## DORIQUE ROMAIN, 25 M. 8 P.

| MEMBRES DE MOULURES qui composent l'ordre. | HAUTEUR. | SAILLIE. |
|---|---|---|
| | Mod.Part. | M d.Part. |
| **ENTABLEMENT, 4 m.** | | |
| *Corniche*, 1 m. 12 p. — Filet de couronnement | 2 | 2 |
| Doucine | 6 | 1 18 |
| Filet | 1 | 1 18 |
| Talon — En haut | | 1 17.5 |
| Talon — En bas | .2. | 1 16.5 |
| Larmier | 7 | 1 16 |
| Talon — En haut | | 1 15 |
| Talon — En bas | .2. | 13.5 |
| Mutules | 6 | 1 13 |
| Largeur du filet horizontal extérieur du canal, 1 p. Profondeur du canal au-dessus du filet extérieur, 1 p. Largeur du filet horizontal intérieur du canal, 1 p. | | |
| Gouttes des mutules — Saillie de leur emplacem. — à l'ext | | 1 8 |
| Gouttes des mutules — Saillie de leur emplacem. — à l'int. | .1. | 8 |
| Les gouttes ont 2 p. 2/3 de grand diamètre; elles sont au nombre de 36 sous chaque mutule; elles sont disposées symétriquement par rang de 6, de manière à occuper un carré. | | |
| Quart de rond | 4 | 7 |
| Filet | 1 | 3 |
| Chapeaux des triglyphes | 4 | 2 |
| *Frise*, 1 m. 12 p. — Triglyphes | 1 12 | 1 |
| Métopes | 1 12 | 0 |
| *Archit.*, 1 m. — Listel | 4 | 4 |
| Chapiteau des gouttes | 1 | 3 |
| Gouttes | 3 | 3 |
| Première plate-bande | 12 | 1 |
| Deuxième plate-bande | 8 | 0 |
| **COLONNE, 16 m.** | | |
| *Chapiteau*, 1 m. — Listel | 1 | 10 |
| Talon — En haut | | 9.5 |
| Talon — En bas | .2. | 8 |
| Tailloir | 5 | 7.5 |
| Quart de rond | 5 | 7 |
| Baguette | 2 | 3 |
| Filet | 1 | 2 |
| Gorgerin — Congé | 2 | 2 |
| Gorgerin — Part. cylindriq. | 6 | 0 |
| *Fût*, 14 m. — Astragale — Baguette | 2 | 3 |
| Astragale — Filet | 1 | 2 |
| Fût — Congé supér. | 2 | 2 |
| Fût — Fût | 13 15.5 | 0 |
| Fût — Congé inférieur | 3.5 | 3.5 |
| *Base*, 1 m. — Filet | 1.33 | 3.5 |
| Baguette | 2.67 | 5 |
| Tore | 8 | 10 |
| Socle ou plinthe | 12 | 10 |
| **PIÉDESTAL, 5 m. 8 p.** | | |
| *Corniche*, 12 p. — Listel | 1 | 12 |
| Quart de rond | 2 | 11.5 |
| Filet | 1 | 9.5 |
| Larmier — Congé | 1.5 | |
| Larmier — Partie droite | 3.5 | 8 |
| Talon — En haut | | 3 |
| Talon — En bas | .3. | 0.5 |
| *Dé*, 4 m. — Socle | 3 21 | 0 |
| Congé | 3 | 3 |
| *Base*, 20 p. — Filet | 1 | 3 |
| Baguette | 2 | 4 |
| Talon renversé | 4 | 7 |
| Deuxième socle | 5 | 8 |
| Premier socle | 8 | 10 |

## IONIQUE, 28 M. 18 P.

| MEMBRES DE MOULURES qui composent l'ordre. | HAUTEUR. | SAILLIE. |
|---|---|---|
| | Mod.Part. | Mod.Part. |
| **ENTABLEMENT, 4 m. 18 p.** | | |
| *Corniche*, 1 m. 27 p. — Filet de couronnement | 3 | 1 26 |
| Doucine ou cimaise supér. | 10 | 1 26 |
| Filet | 1 | 1 16 |
| Talon — En haut | | 1 15 |
| Talon — En bas | .4. | 1 12 |
| Larmier | 12 | 1 11 |
| Refouillement du larmier, 1 p. Larg. du filet horizontal extér. qui borde la mouchette, 4 p. Larg. du filet horizontal intér. qui borde la mouchette, 2 p. | | |
| Quart de rond | 8 | 27 |
| Baguette | 2 | 20 |
| Filet | 1 | 19 |
| Cordon des denticules | 3 | 13 |
| Denticules | 12 | 18 |
| Filet | 2 | 10 |
| Talon ou cim. inf. — En haut | | 8.5 |
| Talon ou cim. inf. — En bas | .8. | 1.5 |
| *Frise*, 1 m. 18 p. | 1 18 | 0 0 |
| *Archit.*, 1 m. 9 p. — Listel | 3 | 10 |
| Talon — En haut | | 9.33 |
| Talon — En bas | 6. | 4 67 |
| Première face | 15 | 4 |
| Deuxième face | 12 | 2 |
| Troisième face | 9 | 0 |
| **COLONNE, 18 m.** | | |
| *Chapiteau*, 24 p. — Filet | 2 | 10 |
| Talon — En haut | | 9 |
| Talon — En bas | .4. | 6 |
| Listel | 2 | 5 |
| Canal des volutes | 6 | 4 |
| Quart de rond — En haut | | 14 |
| Quart de rond — En bas | .10. | 4 |
| *Fût*, 16 m. 9 p. — Astragale — Baguette | 4 | 6 |
| Astragale — Filet | 2 | 4 |
| Fût — Congé supér. | 4 | 4 |
| Fût — Fût | 15 31 | 0 0 |
| Fût — Congé infér. | 4 | 4 |
| *Base*, 1 m. 3 p. — Filet | 3 | 4 |
| Tore | 10 | 9 |
| Filet | 0.5 | 5 |
| Scotie | 4 | 4 |
| Filet | 0.5 | 8 |
| Deux baguettes | 4 | 9 |
| Filet | 0.5 | 8 |
| Scotie | 4 | 6 |
| Filet | 0.5 | 12 |
| Socle | 12 | 14 |
| **PIÉDESTAL, 6 m.** | | |
| *Corniche*, 20 p. — Filet | 1 | 20 |
| Talon — En haut | | 19.5 |
| Talon — En bas | .3. | 17.5 |
| Larmier | 6 | 17 |
| Profond. du refouillement, 1 p. | | |
| Quart de rond | 6 | 9 |
| Baguette | 2 | 4 |
| Filet | 2 | 2.5 |
| *Dé*, 4 m. 32 p. — Congé supérieur | 2.5 | |
| Socle | 4 25.5 | 0 0 |
| Congé inférieur | 4 | 4 |
| *Base*, 20 p. — Filet | 2 | 4 |
| Baguette | 2.67 | 6 |
| Talon renversé | 6 | 14 |
| Filet | 1.33 | 14 |
| Socle | 8 | 16 |

## CORINTHIEN, 31 M. 24 P.

| MEMBRES DE MOULURES qui composent l'ordre. | | HAUTEUR. Mod. | HAUTEUR. Part. | SAILLIE. Mod. | SAILLIE. Part. |
|---|---|---|---|---|---|
| **ENTABLEMENT, 5 m.** | | | | | |
| *Corniche*, 2 m. | Filet de couronnement | | 2 | 2 | 4 |
| | Doucine | | 10 | 2 | 4 |
| | Filet | | 1 | 1 | 30 |
| | Talon, En haut | | | 1 | 29 |
| | Talon, En bas | | 3 | 1 | 27 |
| | Larmier | | 10 | 1 | 26 |
| | Talon, En haut | | | 1 | 25 |
| | Talon, En bas | | 3 | 1 | 23 |
| | Modillon | | 12 | 1 | 22 |
| | Filet | | 1 | | 27 |
| | Quart de rond | | 8 | | 26 |
| | Baguette | | 2 | | 20 |
| | Filet | | 1 | | 19 |
| | Denticules | | 12 | | 18 |
| | Filet | | 1 | | 10 |
| | Talon, En haut | | | | 9.33 |
| | Talon, En bas | | 6 | | 4 |
| *Frise*, 1 m. 18 p. | Baguette | | 2 | | 3.5 |
| | Filet | | 1 | | 2.5 |
| | Congé | | 2.5 | | 2.5 |
| | Partie plane | 1 | 12.5 | 0 | 0 |
| *Architrave*, 1 m. 18 p. | Filet | | 2 | | 10 |
| | Talon, En haut | | | | 9.5 |
| | Talon, En bas | | 8 | | 4.5 |
| | Baguette | | 2 | | 4 |
| | Première face | | 14 | | 3 |
| | Talon, En haut | | | | 2.67 |
| | Talon, En bas | | 4 | | 1.5 |
| | Deuxième face | | 12 | | 1 |
| | Baguette | | 2 | | 1 |
| | Troisième face | | 10 | | 0 |
| **COLONNE, 20 m.** | | | | | |
| *Chapiteau*, 2 m. 12 p. | Quart de rond | | 4 | | |
| | Filet | | 2 | | |
| | Face du tailloir | | 6 | | |
| | Haut. de la lèvre du vase, 4 p. | | | | 13 |
| | Grandes volutes | | 16 | | 34 |
| | Haut. des petites volutes, 12 p. | | | | 18 |
| | Petites feuilles supérieures | | 8 | | 26 |
| | Haut. du rev. de ces feuilles, 4 p. | | | | |
| | Grandes feuilles | | 24 | | 16 |
| | Haut. de leur revers, 6 p. | | | | |
| | Feuilles inférieures | | 24 | | 13 |
| | Revers de ces feuilles, 6 p. | | | | |

| MEMBRES DE MOULURES qui composent l'ordre. | | HAUTEUR. Mod. | HAUTEUR. Part. | SAILLIE. Mod. | SAILLIE. Part. |
|---|---|---|---|---|---|
| ***Suite de la* COLONNE.** | | | | | |
| *Fût*, 16 m. 24 p. | Astragale, Baguette | | | 4 | 6 |
| | Astragale, Filet | | | 2 | 3 |
| | Fût, Congé supér. | | | 3 | 3 |
| | Fût, Fût | 16 | 10 | 0 | 0 |
| | Fût, Congé inférieur | | | 3 | 3 |
| | Fût, Filet | | | 2 | 3 |
| *Base*, 1 m. | Tore | | | 6 | 7 |
| | Filet | | | 0.5 | 4 |
| | Scotie | | | 2.5 | 3 |
| | Filet | | | 0.5 | 6 25 |
| | Deux baguettes | | | 3 | 7 |
| | Filet | | | 0.5 | 6 25 |
| | Scotie | | | 2.5 | 5 |
| | Filet | | | 0.5 | 9 |
| | Tore | | | 8 | 14 |
| | Socle | | | 12 | 14 |
| **PIÉDESTAL, 6 m. 24 p.** | | | | | |
| *Corniche*, 28 p. | Filet | | | 1.33 | 16 |
| | Talon, En haut | | | | 2.67 |
| | Talon, En bas | | | | 15.5 |
| | Larmier | | | 6 | 13.5 |
| | Gorge ou gouttière | | | 2.5 | 13 |
| | Baguette | | | 2 | 6 |
| | Filet | | | 1.5 | 3 |
| | Frise | | | 10 | 2 |
| | Baguette | | | 2 | 0 |
| | | | | | 4 |
| *Dé*, 5 m. 8 p. | Filet | | | 2 | 3 |
| | Congé | | | 3 | 3 |
| | Socle | 4 | 34 | 0 | 0 |
| | Congé | | | 3 | 3 |
| | Filet | | | 2 | 3 |
| *Base*, 24 p. | Baguette | | | 2 | 4 |
| | Talon renversé | | | 6 | 12 |
| | Filet | | | 2 | 12 |
| | Tore | | | 6 | 16 |
| | Socle | | | 8 | 16 |

## COMPOSITE, 31 M. 24 P.

| MEMBRES DE MOULURES qui composent l'ordre. | HAUTEUR. | SAILLIE. |
|---|---|---|
| **ENTABLEMENT, 5 m.** | | |
| | Mod.Part. | Mod.Part. |
| *Corniche*, 2 m. — Filet de couronnement. . . | 3 | 2 |
| Doucine . . . . . | 10 | 2 |
| Filet . . . . . | 2 | 1 26 |
| Talon. . . En haut. . . . | | 1 25 |
| Talon. . . Au bas. . . . | . . .4. . | 1 22 |
| Baguette. . . . . | 2 | 1 21.5 |
| Larmier. . . . . | 10 | 1 20 |
| Doucine, moitié fait partie de la mouchette; pour la moitié en-dessous du larmier. . . . . | 3 | 1 6 |
| Filet . . . . . | 2 | 1 |
| *Frise*, 1 m. 18 p. — Talon. . . En haut. . . . | | 35 |
| Talon. . . Au bas. . . . | . . .8. . | 29 |
| Haut. du filet des denticules, 1 p. | | 22 |
| Denticules. . . . . | 16 | 28 |
| Filet . . . . . | 2 | 16 |
| Quart de rond. . . . . | 10 | 14 |
| *Architrave*, 1 m. 18 p. — Baguette. . . . . | 2 | 4 |
| Filet . . . . . | 1 | 2.5 |
| Congé supérieur. . . . . | 2.5 | 2.5 |
| Partie plane. . . . . | 34.5 | 0 0 |
| Congé inférieur. . . . . | 14 | 14 |
| Filet . . . . . | 2 | 14 |
| Cavet. . . . . | 4 | 11.67 |
| Quart de rond. . . . . | 6 | 11 |
| Baguette. . . . . | 2 | 5 |
| Première face. . . . . | 20 | 4 |
| Talon. . . En haut. . . . | | 3.33 |
| Talon. . . Au bas. . . . | . . .4. . | 0.67 |
| Deuxième face. . . . . | 16 | 0 0 |
| **COLONNE, 20 m.** | | |
| *Chapiteau*, 2 m. 12 p. — Quart de rond. . . . . | 3 | |
| Filet . . . . . | 1 | |
| Haut. de la face du tailloir, 8 p. | | |
| Distance vert de la face du tailloir au quart de rond circulaire, 4 p. | | |
| Haut. du quart de rond, 8 p. | | 12 |
| Haut. de la baguette, 3 p. | | 5 |
| Haut. du filet, 1 p. | | 4 |
| Volutes. . . . . | 32 | 32 |
| Grandes feuilles. . . . . | 24 | 16 |
| Haut. du rev. de ces feuilles, 6 p. | | |
| Petites feuilles. . . . . | 24 | 13 |
| Haut. du rev. de ces feuilles, 6 p. | | |

| MEMBRES DE MOULURES qui composent l'ordre. | HAUTEUR. | SAILLIE. |
|---|---|---|
| *Suite de la* COLONNE. | | |
| | Mod.Part. | Mod.Part. |
| *Fût*, 16 m. 24 p. — Astragale. Baguette. . . . | 4 | 6 |
| Astragale. Filet. . . . . | 2 | 4 |
| Fût. . . . Congé supér. . | 4 | 4 |
| Fût. . . . Fût. . . . . | 16 7 | 0 0 |
| Fût. . . . Congé infér. . | 4 | 4 |
| Fût. . . . Filet. . . . . | 3 | 4 |
| *Base*, 1 m. — Tore . . . . . | 6 | 8 |
| Filet . . . . . | 0.5 | 5 |
| Scotie . . . . . | 3 | 4 |
| Filet . . . . . | 0.5 | 6.67 |
| Baguette. . . . . | 1 | 7.5 |
| Filet . . . . . | 0.5 | 6.67 |
| Scotie . . . . . | 4 | 5.33 |
| Filet . . . . . | 0.5 | 10 |
| Tore . . . . . | 8 | 14 |
| Socle. . . . . | 12 | 14 |
| **PIÉDESTAL, 6 m. 24 p.** | | |
| *Corniche*, 25 p. — Filet . . . . . | 1.33 | 16 |
| Talon. . . En haut. . . . | | 15.5 |
| Talon. . . Au bas. . . . | . . .3. . | 13.5 |
| Larmier. . . . . | 6 | 13 |
| Doucine. . . . . | 2.67 | 7 |
| Filet . . . . . | 1 | 2.5 |
| Cavet. . . . . | 2 | 0.5 |
| Frise. . . . . | 10 | 0 0 |
| Baguette. . . . . | 2 | 4 |
| *Dé*, 5 m. 8 p. — Filet . . . . . | 2 | 2.5 |
| Congé supérieur. . . . . | 2.5 | 2.5 |
| Socle. . . . . | 4 33.5 | 0 0 |
| Congé inférieur. . . . . | 4 | 4 |
| Filet . . . . . | 2 | 4 |
| *Base*, 24 p. — Baguette. . . . . | 2 | 5.5 |
| Talon renversé. En haut. . . . | | 6 |
| Talon renversé. Au bas. . . . | . . .6. . | 10.5 |
| Filet . . . . . | 2 | 12.5 |
| Tore . . . . . | 6 | 16 |
| Socle. . . . . | 8 | 16 |

NOTA. *Membre* est le nom général qu'on donne à toute partie d'architecture, comme une frise, une corniche, etc. Une moulure prend aussi le nom de *membre*, et une moulure accompagnée d'un filet au-dessus ou au-dessous prend le nom de *membre couronné*.

***TABLEAU** comparatif des proportions des parties principales des ordres d'architecture.*

| DÉSIGNATION DES PARTIES. | | | DORIQUE grec. | TOSCAN. | DORIQUE romain. | IONIQUE. | CORINTHIEN. | COMPOSITE. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Mod. Part. | Mod. Part. | Mod. Part. | Mod Part. | Mod. Part. | Mod. Part. |
| Entablement | Corniche | Hauteur | 1 2 | 1 8 | 1 12 | 1 27 | 2 | 2 |
| | | Saillie | 1 4.6 | 1 12 | 2 | 1 26 | 2 4 | 2 |
| | Frise | Hauteur | 1 15 | 1 4 | 1 12 | 1 18 | 1 18 | 1 18 |
| | Architrave | Hauteur | 1 15 | 1 | 1 | 1 9 | 1 18 | 1 18 |
| | | Saillie | 1.95 | 4 | 4 | 10 | 10 | 14 |
| Colonne | Chapiteau | Hauteur | 18.85 | 1 | 1 | 24 | 2 12 | 2 12 |
| | | Saillie | 9.1 | 10 | 10 | 10 | 13*n* | 12*r* |
| | Fût | Hauteur | 10 5.15 | 12 | 14 | 16 9 | 16 24 | 16 24 |
| | | Diamètre en haut (*a*) | 1 12.4 | 1 14 | 1 16 | 1 24 | 1 24 | 1 24 |
| | | Nombre des cannelures | 20*b* | 0 | 20*b* | 24*m* | 24*m* | 24*m* |
| | Base | Hauteur | 8 | 1 | 1 | 1 3 | 1 | 1 |
| | | Saillie | 3.73 | 9 | 10 | 14 | 14 | 14 |
| Piédestal | Corniche | Hauteur | 10.4 | 12 | 12 | 20 | 28 | 28 |
| | | Saillie | 6.06 | 8 | 12 | 20 | 16 | 16 |
| | Dé | Hauteur | 2 9.9 | 3 16 | 4 | 4 32 | 5 8 | 5 8 |
| | | Saillie sur le fût | 3.73 | 9 | 10 | 14 | 14 | 14 |
| | Base | Hauteur | 11.7 | 12 | 20 | 20 | 24 | 24 |
| | | Saillie | 4.33 | 8 | 10 | 16 | 16 | 16 |
| Hauteur totale | | de l'entablement | 4 8 | 3 12 | 4 | 4 18 | 5 | 5 |
| | | de la colonne | 11 8 | 14 | 16 | 18 | 20 | 20 |
| | | du piédestal | 3 8 | 4 16 | 5 8 | 6 | 6 24 | 6 24 |
| | | de l'ordre | 19 | 22 4 | 25 8 | 28 18 | 31 24 | 31 24 |
| Entre-colonnement, mesuré d'axe en axe des colonnes | | | » | 6 16 | 7 12 | 6 18 | 6 24 | 6 24 |
| Portique sans piédestal | Distance d'axe en axe des colonnes | | » | 9 12 | 10 | 11 18 | 12 | 12 |
| | Ouverture de l'arcade entre les piédroits | | » | 6 12 | 7 | 8 18 | 9 | 9 |
| | Distance verticale de la clef de l'arcade au-dessous de l'architrave | | » | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| Portique avec piédestal | Distance d'axe en axe des colonnes | | » | 12 18 | 15 | 15 | 16 | 16 |
| | Ouverture de l'arcade entre les piédroits | | » | 8 18 | 10 | 11 | 12 | 12 |
| | Distance verticale de la clef au-dessous de l'architrave | | » | 1 4 | 1 8 | 2 | *1 24 | 1 24 |

(*a*) Le diamètre ne commence à décroître qu'à partir du tiers de la hauteur du fût; dans le dorique grec, il décroit depuis le bas.

*b* Cannelures creusées en arc de cercle, et seulement séparées entre elles par une arête vive légèrement arrondie. La largeur des cannelures est égale à leur rayon.

*m* Cannelures creusées en demi-cercle et séparées par un listel du tiers de leur largeur.

*n* Cette saillie est celle de la lèvre du vase; cette lèvre est circulaire; au lieu que les parties qui la surmontent ont la forme indiquée planche première.

*r* Cette saillie est celle du quart de rond; consulter le tableau page 543 et la planche première.

NOTA. Les colonnes des portiques doivent être engagées du 1/4 de leur diamètre dans les piédroits, c'est-à-dire qu'elles doivent saillir des 3/4 de leur diamètre.

Dans une colonnade, la distance des colonnes au mur de l'édifice est au moins égale à la distance des colonnes; elle est quelquefois double de cette distance, et même triple pour l'ordre corinthien.

Quelquefois les colonnes vont en s'amincissant depuis le bas jusqu'en haut; mais ordinairement on ne fait décroître leur diamètre qu'à partir du 1/3 de la hauteur du fût, et, afin qu'elles ne paraissent pas renfler en ce point, on ne les fait décroître que d'une manière progressive. Généralement la diminution du diamètre du fût est de 1/5 de son diamètre à sa base pour l'ordre Toscan, 1/6 pour le Dorique romain, 1/7 pour l'ordre Ionique, et 1/8 pour le Corinthien et le Composite.

485. *Corniches des maisons d'habitation.* On proportionne leurs dimensions à l'importance de l'édifice, et lorsqu'on veut s'astreindre à leur donner les dimensions d'un ordre d'architecture, on détermine ces proportions en considérant la hauteur totale du mur (corniche comprise), comme étant celle de l'ordre complet adopté pour la corniche. Ainsi la corniche devant être de l'ordre romain et le mur ayant 12 mètres de hauteur, comme le dorique a 25 modules 8 parties ou 25,33 modules de hauteur totale, et sa corniche 1 module 12 parties ou 1,5 module (484), on a

$$25{,}33 : 1{,}5 = 12 : x, \quad \text{d'où} \quad x = 0^{m},71.$$

$x$ hauteur de la corniche à construire.

## ÉPAISSEURS DES MURS.

486. *Formules empiriques données par Rondelet pour déterminer les épaisseurs des murs* (Traité sur l'art de bâtir).

1° *Murs d'enceintes non couvertes.* D'après les observations de Rondelet sur des édifices de tous genres, il résulte qu'un mur jouira d'une forte stabilité s'il a pour épaisseur le 1/8 de sa hauteur, que le 1/10 lui procurera une stabilité moyenne, et le 1/12 le moindre degré de stabilité qu'il puisse avoir. Cependant, comme dans les édifices les murs se consolident mutuellement, il en résulte qu'avec une moindre épaisseur ils peuvent avoir quelquefois une stabilité suffisante.

Un mur tout à fait isolé résiste moins qu'un mur entretenu par un autre à une de ses extrémités, et celui-ci, moins qu'un mur soutenu par un autre à chacune de ses extrémités. De plus, un mur soutenu par un autre à ses deux extrémités exige une épaisseur d'autant plus grande qu'il a plus de longueur, et quand il est très-long, son épaisseur doit être la même que s'il était isolé.

Supposons que l'on a un espace rectangulaire non couvert à entourer de murs, soient AB et AB', figure 1re, planche II, les dimensions de ce rectangle, c'est-à-dire les longueurs des murs. Pour avoir leurs épaisseurs, au point A on élève une perpendiculaire AC égale à leur hauteur;

du point C comme centre, avec un rayon égal au 1/8, au 1/10 ou au 1/12 de AC, suivant que la stabilité doit être grande, moyenne ou faible, on décrit un arc de cercle *mn;* on mène la droite CB, qui rencontre l'arc *mn* au point *o;* du point *o* on abaisse la perpendiculaire *or* sur AC, et *or* est l'épaisseur du mur dont la longueur est AB.

Pour avoir l'épaisseur du mur dont la longueur est AB', il suffit de mener CB', et du point *p*, où cette droite rencontre l'arc *mn*, d'abaisser la perpendiculaire *ps*, qui est l'épaisseur du mur dont la longueur est AB'.

Si l'espace à entourer n'était pas un rectangle, mais un polygone quelconque, on déterminerait l'épaisseur de chaque mur en opérant comme on vient de le faire pour les murs AB et AB'.

Si tous les murs n'avaient pas la même hauteur, on opérerait encore de la même manière, mais en prenant la perpendiculaire AC égale à la hauteur de chacun d'eux.

Le triangle rectangle ABC donne $BC = \sqrt{\overline{AB}^2 + \overline{AC}^2}$ (*Int.*, 647). Les deux triangles semblables ABC et C*or* donnent (*Int.*, 611) *or* : Co = AB : CB = AB : $\sqrt{\overline{AB}^2 + \overline{AC}^2}$; d'où l'on tire, en faisant $Co = \frac{AC}{8}$,

$$or = \frac{AC}{8} \times \frac{AB}{\sqrt{\overline{AB}^2 + \overline{AC}^2}} \quad \text{ou} \quad e = \frac{h}{8} \times \frac{l}{\sqrt{l^2 + h^2}}.$$

$or = e$ épaisseur du mur en mètres ;
$AC = h$ hauteur du mur en mètres ;
$AB = l$ longueur du mur en mètres ;
$\frac{1}{8}$ coefficient qui varie suivant l'exposition du mur au vent et la nature des matériaux, et que Rondelet fait encore varier de 1/8 à 1/12 pour les mêmes matériaux, suivant qu'il veut donner au mur une plus ou moins grande stabilité.

La construction graphique et la formule précédente font voir que l'épaisseur d'un mur est d'autant plus forte que la hauteur et la longueur sont plus grandes.

2° *Murs isolés.* Si *l* est très-grand par rapport à *h*, ce qui peut arriver pour un mur de clôture par exemple, la formule précédente donne sensiblement

$$e = \frac{h}{8}$$

La construction graphique donne le même résultat; car si la longueur AB est très-grande par rapport à AC, CB est sensiblement parallèle à AB, et la perpendiculaire *or* diffère peu du 1/8 de AC, valeur que l'on adopterait pour un mur isolé, c'est-à-dire pour un mur qui ne serait entretenu par aucun autre.

Pour qu'un mur isolé résiste à la poussée du vent, il suffit que le mo-

ment de son poids, par rapport à son arête extérieure de contact avec la surface du sol, autour de laquelle le vent tend à le faire tourner, soit au moins égal au moment de la poussée du vent, pris également par rapport à cette arête; ainsi, pour l'équilibre statique, il suffit que l'on ait, par mètre de longueur de mur (*Int.*, 1411)

$$eh\delta \times \frac{e}{2} = ph \times \frac{h}{2}\ ;\ \text{d'où l'on tire}\ e = \sqrt{\frac{ph}{\delta}}.$$

$p$ pression du vent contre le mur, en kilogrammes par mètre carré de surface; elle est variable suivant les lieux; sur les bords de la mer, un vent qui vient du large peut donner $p = 278$ kilog. (209);

$ph$ pression du vent contre un mètre de longueur de mur; comme elle agit avec un bras de levier $\frac{h}{2}$ pour renverser le mur, son moment est $ph \times \frac{h}{2}$;

$\delta$ poids d'un mètre cube de maçonnerie (46);

$eh$ volume d'un mètre de longueur de mur; $eh\delta$ est son poids, et comme ce poids, qui est appliqué au centre de gravité du mur, a pour bras de levier $\frac{e}{2}$, il en résulte que son moment est $eh\delta \times \frac{e}{2}$.

Faisant dans cette formule $p = 278_k$, $h = 2^m,60$ et $\delta = 2200^k$, on en conclut, pour ce cas extrême, $e = 0^m,573$. La formule empirique précédente de Rondelet, en y faisant $h = 2^m,60$, et en supposant $l$ très-grand, comme pour un mur de clôture, par exemple, donne seulement $e = 0^m,325$.

3° *Murs circulaires.* De tels murs pouvant être considérés comme formés d'une infinité d'autres d'une longueur infiniment petite et s'appuyant mutuellement par leurs extrémités, il en résulte qu'ils devraient subsister avec une épaisseur aussi faible que possible; c'est en effet ce que confirme l'expérience suivante : si l'on prend une grande feuille de papier, il sera impossible de la faire tenir debout en ligne droite, au lieu que si on la contourne en cylindre, elle se tiendra avec une certaine stabilité, quoique son épaisseur ne soit pas un millième de sa hauteur.

Cependant, comme ces murs doivent avoir une certaine épaisseur pour être solides, il conviendra, pour déterminer l'épaisseur d'un mur circulaire, de considérer l'enceinte comme étant un polygone régulier de douze côtés, ou, pour plus de facilité, de chercher simplement l'épaisseur d'un mur droit d'une longueur égale à la moitié du rayon de l'enceinte, et soutenu à ses deux extrémités. La formule du 1° devient alors

$$e = \frac{h}{8} \times \frac{\frac{r}{2}}{\sqrt{\frac{r^2}{4} + h^2}}.$$

$r$ rayon de l'enceinte.

4° *Murs des bâtiments couverts d'un simple toit.* Lorsque la charpente qui forme le toit d'un édifice est bien entendue, loin de nuire à la solidité des murs ou points d'appui qui la soutiennent, elle sert à les entretenir. Rondelet, pour établir une règle sûre et facile pour déterminer l'épaisseur à donner aux murs des édifices qui ne sont pas voûtés, a considéré que les entraits des fermes de charpente qui forment les combles étant toujours disposés dans le sens de la largeur L des bâtiments, ainsi que les poutres et les solives des planchers, ils doivent servir à entretenir les murs qui les supportent ; mais qu'à cause de l'élasticité et de la flexibilité dont les bois sont susceptibles, ils ne laissent pas de fatiguer les murs en raison de la plus grande largeur des espaces qu'ils renferment, et que par conséquent c'est la largeur et la hauteur des pièces qui doivent servir à déterminer l'épaisseur des murs. Ainsi, pour déterminer l'épaisseur des murs d'un édifice couvert d'un simple toit, quand rien ne s'appuie contre les faces de ces murs jusque sous les entraits de la ferme du comble, on prendra AB (figure 1, planche II) égal, non à la longueur du mur, mais à la largeur du bâtiment, et on décrira l'arc *mn* avec le 1/12 de la hauteur du mur pour rayon, au lieu du 1/8 ; ce qui donnera alors la formule

$$e = \frac{h}{12} \times \frac{\mathrm{L}}{\sqrt{\mathrm{L}^2 + h^2}}.$$

L largeur du bâtiment.

Si les murs qui supportent le toit étaient appuyés à une certaine hauteur par d'autres constructions ou par des toits inférieurs s'appuyant contre leurs faces extérieures, comme des appentis, ce qui a lieu dans les églises en basilique, l'arc *mn* serait décrit avec un rayon égal à la 24e partie de la somme obtenue en ajoutant à la hauteur totale $h$ du mur la hauteur $h'$ dont ce mur surmonte l'appui extérieur ; on ferait $\mathrm{AC} = h + h'$, $h'$ étant la distance verticale du faîte de l'appentis à la naissance du toit qui recouvre l'édifice. La formule précédente devient alors

$$e = \frac{h + h'}{24} \times \frac{\mathrm{L}}{\sqrt{\mathrm{L}^2 + (h + h')^2}}.$$

5° *Murs de maisons d'habitation.* Rondelet observe que dans les maisons ordinaires, où la hauteur des planchers ne dépasse pas $3^{m},90$ à $4^{m},87$, pour déterminer l'épaisseur des murs de refend, il ne faut avoir égard qu'à la longueur de l'espace qu'ils divisent et au nombre de planchers qu'ils ont à soutenir ; mais que quant aux murs de face, qui sont isolés d'un côté dans toute leur hauteur, il faut avoir égard à la largeur du bâtiment et à son élévation.

Pour un *corps de logis simple*, figure 3, planche II, dont les mêmes pièces tiennent toute la largeur ou profondeur L du bâtiment, pour

déterminer l'épaisseur des murs de face, on ajoute la largeur $ab = L$ à la moitié de la hauteur du bâtiment sous la naissance du toit, et le 1/24 de cette somme est l'épaisseur à donner à chacun des murs de face, au-dessus du socle ou première retraite du rez-de-chaussée. Cette règle revient à la formule

$$e = \frac{L + \frac{h}{2}}{24}.$$

Pour une construction moyenne, on augmente $e$ de $0^m,027$, et de $0^m,054$ pour une construction solide.

Pour un *corps de logis double*, fig. 11, pl. II, c'est-à-dire pour un corps de logis divisé en deux par un mur $ab$ parallèle aux murs de face, on obtient l'épaisseur à donner aux murs de face en ajoutant la largeur $cd = L$ à la hauteur du bâtiment et en prenant le 1/48 de cette somme; ce qui revient à la formule

$$e = \frac{L + h}{48}.$$

Pour déterminer l'épaisseur à donner à un *mur de refend ef*, fig. 11, planche II, on ajoute à la longueur $dg = L'$ de l'espace que ce mur doit diviser la hauteur H de l'étage, et on prend le 1/36 de cette somme; ce qui conduit à la formule

$$e = \frac{L' + H}{36}.$$

On peut ajouter 1/2 pouce ($0^m,0135$) pour chaque étage au-dessus du rez-de-chaussée; ainsi, pour trois étages, on ajouterait $0^m,0405$ à la valeur de $e$ pour avoir l'épaisseur du mur par le bas. Cette proportion est celle qui convient pour les constructions en briques ou en pierres d'une dureté moyenne. Si l'on est obligé d'employer des pierres tendres ou les tufs en usage dans quelques départements, au lieu de 1/2 pouce, on ajoute 1 pouce par étage à la valeur de $e$.

Pour déterminer l'épaisseur du mur $ab$ qui divise l'espace compris entre les murs de face, même figure, on opère de la même manière que pour le mur *ef*. Ainsi, en supposant que *hi* ne soit qu'une légère séparation augmentant peu la solidité, on ajoute la longueur *cd* de l'espace divisé par ce mur à la hauteur de l'étage, et on prend le 1/36 de la somme; le résultat trouvé est l'épaisseur qu'il faut donner au mur s'il ne s'élève que d'un étage. Pour une plus grande hauteur, on ajoute encore 1/2 pouce par étage au-dessus du rez-de-chaussée.

*Pans de bois et cloisons.* Lorsqu'à un mur on substitue un pan de bois en charpente, hourdé en plâtre et ravalé des deux côtés pour ne former qu'une seule pièce, il suffit de lui donner la moitié de l'épaisseur que devrait avoir, d'après la règle, le mur qu'il remplace. Pour

une cloison légère qui ne porte pas de plancher, 1/4 de l'épaisseur du mur suffit.

*Appuis isolés.* L'épaisseur des appuis isolés maintenus d'aplomb par les parties environnantes varie du 1/8 au 1/12 de leur hauteur.

**487.** *Épaisseurs ordinaires des murs.* Les observations qui ont permis à Rondelet d'établir les formules du numéro précédent lui ont fait reconnaître que, pour les maisons d'habitation divisées en plusieurs étages par des planchers et entrecoupées par des murs de refend ou des pans de bois, les murs de face avaient une épaisseur de $0^m,41$ à $0^m,65$; les murs mitoyens, de $0^m,435$ à $0^m,54$, et les murs de refend, de $0^m,325$ à $0^m,487$.

Les murs mitoyens renfermant ordinairement les cheminées des deux maisons voisines, leur moindre épaisseur $0^m,435$ est plus forte que la plus faible $0^m,41$ des murs de face

En général, les données précédentes de Rondelet ne diffèrent pas sensiblement des épaisseurs en usage aujourd'hui dans la pratique, épaisseurs que contient le tableau suivant.

*TABLEAU des épaisseurs en usage pour les murs de maisons d'habitation de largeur moyenne et d'une hauteur de 3 à 4 étages.*

| DÉSIGNATION DES PARTIES DES MURS. | MURS de face. | MURS de refend. | HAUTEUR d'étage. |
|---|---|---|---|
| Aux fondations. . . . . | $0^m.75$ à $1^m.00$ | $0^m.70$ à $0^m.85$ | |
| Au niveau du sol. . des caves. . . . . | 0 .55 0 .80 | 0 .50 0 .65 | |
| du rez-de-chaussée. . . | 0 .50 0 .65 | 0 .35 0 .40 | |
| Au-dessus du 1er étage. . . . . | 0 .45 0 .55 | » | $3^m.25$ à $5^m.00$ |
| du 2e étage. . . . . | 0 .40 0 .50 | 0 .30 0 .35 | 3 .00 4 .25 |
| plancher du 3e étage. . . . . | 0 .32 0 .40 | 0 .25 0 .30 | 2 .80 3 .50 |

| | ÉPAISSEURS AU REZ-DE-CHAUSSÉE. MURS de face. | mitoyens. | de refend. |
|---|---|---|---|
| Bâtiments plus considérables que les maisons d'habitation. . . . | $0^m.65$ à $1^m.00$ | $0^m.55$ à $0^m.65$ | $0^m.40$ à $0^m.55$ |
| Palais ou édifices avec voûtes au rez-de-chaussée. . . . . | 1 .20 2 .50 | 1 .00 1 .50 | 0 .70 1 .20 |

**488.** *Espace occupé par les murs.* Rondelet a aussi déterminé le rapport de l'espace occupé par les murs et points d'appui, déduction faite de l'espace occupé par les portes et les fenêtres, à l'espace total occupé par les édifices; il a trouvé :

1° Pour les palais de Rome, dont les pièces du rez-de-chaussée sont voûtées. . . . . $\frac{2}{9} = 0{,}222$

2° Pour les bâtiments avec planchers, du siècle de Louis XIV. . . . . $\frac{1}{6} = 0{,}166$

3° Pour les bâtiments du siècle de Louis XV et ceux faits depuis. . . . . $\frac{1}{8} = 0{,}125$

4° Pour les bâtiments actuels en briques. . . . . $\frac{2}{17} = 0{,}117$

En ne déduisant pas les vides des portes et croisées, ce rapport est 1/4 pour les palais de Rome ; 1/4 pour ceux avec planchers construits sur la fin du règne de Louis XIV ou au commencement de celui de Louis XV, et 2/15 dans les bâtiments en briques.

Dans plusieurs bâtiments de Paris bâtis depuis le règne de Louis XV, les murs et points d'appui sont le 1/5, en ne déduisant pas les vides, et les 2/15 en les déduisant ; c'est à peu près les proportions que donne la règle des moindres épaisseurs proposée par Rondelet, c'est-à-dire les 3/16 sans déduction des vides et les 2/16 avec déduction.

Dans les palais de Paris et des environs, tels que le Louvre, les Tuileries, le Luxembourg, Versailles, les murs et points d'appui occupent les 7/18, et les 5/18 en déduisant les vides des portes, croisées, arcades et autres.

A Paris, dans les bâtiments actuels, le rapport de la superficie occupée par les murs, déduction des vides, à celle des appartements qu'ils embrassent est environ 1/8.

## DIMENSIONS DES DIFFÉRENTES PARTIES D'UN ÉDIFICE.

**489.** *Largeur de la façade d'un édifice.* L'axe de la façade d'un édifice quelconque doit passer par le milieu d'une ouverture, et les deux moitiés de la façade doivent être symétriques par rapport à cet axe.

Pour un pavillon isolé, la longueur de la façade est ordinairement égale à la hauteur.

Pour un édifice ordinaire, la longueur de la façade varie de une fois 1/2 à trois fois la hauteur. Lorsque la destination du bâtiment exige une plus grande longueur, on varie la façade en élevant des arrière ou avant-corps, ou simplement en la divisant par des chaînes saillantes ; mais, malgré ces précautions, dans aucun cas la longueur ne doit dépasser dix fois la hauteur, limite qu'il ne convient d'atteindre que pour les casernes, les magasins, les ateliers et autres bâtiments de ce genre.

**490.** *Ordonnance du 1er novembre 1844, concernant la hauteur des bâtiments et de leurs combles dans Paris.* (L'ordonnance du 15 juillet 1848 n'est plus en vigueur.)

TITRE I. — *De la hauteur des façades bordant la voie publique.*

ART. 1er. La hauteur des façades bordant les voies publiques est déterminée par la largeur de ces voies publiques.

Le maximum de cette hauteur, y compris les corniches ou entablements, ainsi que les

attiques construits à plomb desdites façades, est de 11m,70 pour les voies publiques de moins de 7m,47; 14m,62 par les voies publiques de 7m,47 et au-dessus, jusques et compris 9m,42; et 17m,55 pour les voies publiques au-dessus de 9m,42.

ART. 2. Pour les bâtiments neufs et pour les anciens bâtiments reconstruits de fond en comble, c'est la largeur future de la voie publique qui règle la hauteur des façades.

Pour les reconstructions partielles et pour les exhaussements, c'est la largeur présente de la voie publique qui règle la hauteur des façades, dans le cas même où ces façades ne doivent pas subir de retranchement.

ART. 3. Tout bâtiment formant encoignure, et donnant par conséquent sur deux, trois ou quatre voies publiques, peut, par exception, lorsque ces voies publiques sont d'inégales largeurs, être élevé sur les plus étroites à la hauteur fixée pour la plus large.

Cette exception n'a lieu que dans l'épaisseur du bâtiment, et ne peut, dans aucun cas, excéder une longueur de 15 mètres de face à partir des encoignures.

ART. 4. Dans les bâtiments situés entre deux voies publiques d'inégales largeurs, la façade bordant la voie publique la moins large peut aussi, par exception, être à la hauteur fixée pour la plus large; mais dans le cas seulement où la plus grande distance entre les deux façades du bâtiment n'excède pas 15 mètres.

ART. 5. Lorsqu'on fait des constructions qui couvrent toute la superficie d'un terrain situé entre deux voies publiques d'ingales largeurs, et distantes l'une de l'autre de plus de 15 mètres, le corps de bâtiment bordant la voie publique la plus large peut également, par exception, être élevé à la hauteur permise pour cette dernière voie publique du côté le moins large, mais dans le cas seulement où la plus grande épaisseur du bâtiment n'excède pas 15 mètres.

Pour les constructions occupant le surplus de l'épaisseur 15 mètres, et bordant par conséquent la voie publique la moins large, la hauteur des façades ne peut excéder celle fixée en raison de la largeur de cette voie publique.

ART. 6. La largeur des voies publiques est prise au devant des façades, et lorsque les voies publiques n'ont pas leurs côtés parallèles, c'est la moindre largeur qui règle la hauteur des façades.

Si le débouché d'une autre voie publique est vis-à-vis desdites façades, la largeur se prend à partir d'une ligne fictive allant de l'une à l'autre encoignure de ce débouché.

Il en est de même pour les bâtiments situés dans les carrefours formés par le débouché de plusieurs voies publiques (on prend pour largeur la plus petite de celles que peuvent déterminer les droites fictives joignant chaque encoignure à toutes les autres).

ART. 7. La hauteur des façades des bâtiments donnant sur une seule voie publique est mesurée à partir, soit du pavé, soit du dallage du trottoir (la hauteur, au pied des façades, s'établit ainsi qu'il suit : 0m,17 au-dessus du fond du ruisseau, plus 0m,04 par mètre de pente), en se plaçant, lorsque la voie publique est en pente, sur le point le plus bas, afin que, conformément à l'art. 1er, les façades ne puissent excéder dans aucune de leurs parties la hauteur légale.

Par la même raison, lorsque les bâtiments donnent sur plusieurs voies publiques de niveaux différents, la hauteur est mesurée sur la façade bordant la voie publique la moins élevée, et aussi en se plaçant sur le point le plus bas lorsque cette voie publique est inclinée.

## TITRE II. — *Des combles.*

ART. 8. Dans les bâtiments simples ou doubles ayant deux murs de face, et dont les combles sont par conséquent à deux versants, lorsque l'épaisseur de ces bâtiments a moins de 9m,74, la hauteur des combles ne peut excéder la moitié de l'épaisseur desdits bâtiments, et lorsque cette épaisseur est de 9m,74 et au-dessus, le maximum de hauteur est de 4m,87.

ART. 9. Dans les bâtiments n'ayant qu'un mur de face, tels que sont les bâtiments

adossés contre des murs mitoyens, et dont par conséquent les combles sont à un seul versant, lorsque ces bâtiments ont moins de 4m,87 d'épaisseur, la hauteur des combles ne peut pas excéder l'épaisseur desdits bâtiments, et lorsque cette épaisseur est de 4m,87 et au-dessus, ces 4m,87 sont le maximum de hauteur des combles.

ART. 10. Pour les bâtiments ayant deux murs de face, l'épaisseur est celle comprise entre les parements extérieurs desdits murs.

ART. 11. Pour les bâtiments n'ayant qu'un seul mur de face, l'épaisseur est celle comprise entre le parement extérieur dudit mur et le parement intérieur du mur mitoyen contre lequel le bâtiment est adossé.

ART. 12. Lorsque les deux murs de face ne sont pas parallèles, c'est l'épaisseur moyenne des bâtiments qui règle la hauteur des combles.

ART. 13. A l'égard du profil de ces combles, la ligne déterminant leur versant du côté de la voie publique est droite; elle peut partir de la saillie de la corniche, et l'angle que cette ligne forme avec celle horizontale représentant la base du comble est au plus de 45°.

Il résulte de cette disposition que dans les bâtiments de 9m,74 d'épaisseur et au-dessus, la ligne déterminant le versant du comble ne pouvant correspondre avec la verticale passant par le milieu du bâtiment qu'en excédant la hauteur fixée, le comble est tronqué dans sa partie supérieure, de manière à former une terrasse dont le point culminant ne doit pas excéder la hauteur fixée pour le comble.

ART. 14. La hauteur des combles est mesurée à partir d'un ligne horizontale passant par un point dont la position est déterminée par la hauteur légale du mur de face sur la voie publique.

ART. 15. Les égouts construits à la naissance du versant des combles ne sont tolérés, quant à présent, que lorsque leur saillie n'excède pas 0m.10 sur celles des corniches.

ART. 16. Le relief des cheneaux ne peut excéder la ligne droite, réelle ou fictive, partant de la saillie de la corniche et formant avec l'horizontale déterminant la base du comble un angle de 45°.

ART. 17. La face extérieure des lucarnes doit être placée en arrière du parement extérieur du mur de face donnant sur la voie publique, et à une distance d'au moins 0m,30.

Leur hauteur, y compris la toiture, ne peut excéder 3 mètres dans les combles ayant de 4m,50 à 4m,87 d'élévation à partir de la ligne de base de ces combles.

Dans les combles moins élevés, la hauteur des lucarnes ne peut excéder les 2/3 de leur élévation (l'administration permet aujourd'hui de l'augmenter jusqu'à la hauteur du faîtage).

La largeur hors œuvre des lucarnes ne peut excéder 1m,50; leurs jouées doivent être parallèles. L'intervalle desdites lucarnes, lors même qu'on leur donne moins de 1m,50 de largeur, doit être au moins de 1m,50.

Enfin, la saillie de leurs corniches, égouts compris, ne doit pas excéder 0m,15.

ART. 18. Les tuyaux de cheminées et les murs contre lesquels ils sont adossés ne peuvent percer la ligne rampante du comble, qu'à une distance de 1m,50 prise horizontalement à partir d'une verticale passant sur le parement extérieur du mur de face bordant la voie publique, et ces constructions ne peuvent, dans aucun cas, excéder de plus d'un mètre la hauteur des combles.

**491.** En vertu d'une loi du 13 avril 1850, une commission est instituée à Paris pour rechercher les logements insalubres, indiquer les travaux à faire pour les rendre salubres, et, si le propriétaire se refuse à les faire, le condamner à une amende de 100 fr. pour la première fois, et du montant, et même du double des travaux à faire pour la seconde.

**492.** *Décret du 26 mars 1852 concernant les conditions de construction dans Paris.*

ART. 1er. Les rues de Paris continueront d'être soumises au régime de la grande voirie.

ART. 2. Dans tout projet d'expropriation pour l'élargissement, le redressement ou la formation des rues de Paris, l'administration aura le droit de comprendre la totalité des immeubles atteints lorsqu'elle jugera que les parties restantes ne sont pas d'une étendue ou d'une forme qui permette d'y élever des constructions salubres.

Elle pourra pareillement comprendre dans l'expropriation des immeubles en dehors des alignements, lorsque leur acquisition sera nécessaire pour la suppression d'anciennes voies jugées inutiles.

Les parcelles de terrains acquises en dehors des alignements, et non susceptibles de recevoir des constructions salubres, seront réunies aux propriétés contiguës, soit à l'amiable, soit par l'expropriation de ces propriétés, conformément à l'art. 53 de la loi du 16 septembre 1807.

La fixation du prix de ces terrains sera faite suivant les mêmes formes et devant la même juridiction que celle des expropriations ordinaires.

L'art. 58 de la loi du 3 mai 1841 est applicable à tous les actes et contrats relatifs aux terrains acquis pour la voie publique par simple mesure de voirie.

ART. 3. A l'avenir l'étude de tout plan d'alignement de rue devra nécessairement comprendre le nivellement; celui-ci sera soumis à toutes les formalités qui régissent l'alignement.

Tout constructeur de maison, avant de se mettre à l'œuvre, devra demander l'alignement et le nivellement de la voie publique au devant de son terrain, et s'y conformer.

ART. 4. Il devra pareillement adresser à l'administration un plan et des coupes cotés des constructions qu'il projette, et se soumettre aux prescriptions qui lui seront faites dans l'intérêt de la sûreté publique et de la salubrité.

Vingt jours après le dépôt de ces plans et coupes au secrétariat de la préfecture de la Seine, le constructeur pourra commencer les travaux d'après son plan, s'il ne lui a été notifié aucune injonction.

Une coupe géologique des fouilles pour fondation du bâtiment sera dressée par tout architecte constructeur, et remise à la préfecture de la Seine.

ART. 5. Les façades de maisons seront constamment tenues en bon état de propreté. Elles seront grattées, repeintes ou badigeonnées au moins une fois tous les dix ans, sur l'injonction qui sera faite au propriétaire par l'autorité municipale. Les contrevenants seront passibles d'une amende qui ne pourra excéder 100 fr.

ART. 6. Toute construction nouvelle dans une rue pourvue d'égout devra être disposée de manière à y conduire les eaux pluviales et ménagères.

La même disposition sera prise pour toute maison ancienne en cas de grosses réparations, et, en tout cas, avant dix ans.

ART. 7. Il sera statué par un décret ultérieur, rendu dans la forme des règlements d'administration publique, en ce qui concerne la hauteur des maisons, les combles et les lucarnes.

ART. 8. Les propriétaires riverains des voies publiques empierrées supporteront les frais de premier établissement des travaux, d'après les règles qui existent à l'égard des propriétaires riverains des rues pavées.

ART. 9. Les dispositions du présent décret pourront être appliquées à toutes les villes qui en feront la demande, par des décrets spéciaux rendus en la forme des règlements d'administration publique.

493. *Division de la hauteur d'un bâtiment. Hauteur des étages.* Pour un bâtiment à deux étages, on divise la hauteur en seize parties égales, et on donne sept parties au rez-de-chaussée, cinq au premier étage et quatre au second.

Pour un bâtiment à un seul étage, on divise la hauteur totale en douze parties égales, sept parties pour le rez-de-chaussée et cinq pour l'étage.

Mandar donne pour les maisons d'habitation les hauteurs suivantes :

| Caves. | Rez-de-chaussée. | Entresol. |
|---|---|---|
| 2m,27 à 2m,92 | 3m,25 à 4m,22 et jusqu'à 5m,20 | 2m,27 à 2m.60. |

| 1er étage. | 2e étage. | 3e étage. | 4e étage. |
|---|---|---|---|
| 3m,25 à 3m,90 et jusqu'à 5m,85 | 2m,92 à 3m,90 | 2m,60 à 2m,92 | 2m,27 à 2m,60. |

Le même auteur compte de 0m,41 à 0m,54 pour les épaisseurs des voûtes de caves, plus 0m,11 à 0m,16 de charge, et de 0m,41 à 0m,49 pour les épaisseurs des planchers, y compris carreau ou parquet et plafond.

L'administration parisienne ne tolère plus, dans les constructions nouvelles, moins de 2m,60 de hauteur d'étage.

494. *Arcades.* Quand on veut conserver aux murs la plus grande solidité possible, ce qui est indispensable dans les entrepôts, les magasins, etc., la hauteur de l'arcade est seulement égale à une fois la largeur entre les piliers; dans quelques édifices, elle est égale à une fois 1/2 cette largeur, et dans les portiques ordinaires elle est égale à deux fois.

Quand les arcades sont séparées entre elles par un accouplement de colonnes, l'entr'axe des colonnes accouplées est la moitié de l'entr'axe des colonnes qui limitent l'arcade, c'est-à-dire le 1/3 de la largeur totale de l'arcade, mais seulement pour les ordres inférieurs; pour les ordres élevés l'entr'axe des colonnes accouplées est le 1/4 de l'entr'axe total.

Dans les arcades sur piliers, la largeur du pilier est ordinairement égale à la moitié de l'ouverture de l'arcade, c'est-à-dire au 1/3 de l'entr'axe des piliers. On peut diminuer cette largeur : ainsi, rue de Rivoli, les piliers ont 0m,86 de largeur sur 0m,65 d'épaisseur, pour une distance de 2m,86 mesurée entre les piliers; ces arcades ont 5m,83 de hauteur, la distance des piliers aux pilastres qui leur font symétrie contre les devantures des boutiques est de 3m,40, les dés servant de base aux piliers ont 0m,75 de hauteur, et ils font saillie de 0m,05 tout autour de ces piliers.

493. *Frontons.* Leur montée varie du 1/5 au 1/6 de leur largeur.

496. *Portes et croisées.* Les deux dimensions des portes et croisées sont entre elles dans le même rapport que les dimensions des arcades (494); ainsi la hauteur varie de une à deux fois la largeur, et même, pour les entre-sols, la hauteur des croisées n'est quelquefois que les 2/3 de la largeur.

Une croisée carrée prend le nom de *mezzanine.*

Pour l'ordre Toscan, la hauteur des portes et croisées se fait égale à une fois 11/12 la largeur, pour le dorique deux fois, pour l'ionique deux fois 1/12, et pour le corinthien deux fois 1/6.

*Dimensions des portes et croisées, et hauteur des appuis*, d'après Mandar.

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Portes | charretières | | 2m.92 à 3m.25 de largeur. | | |
| | cochères | | 2 .60 | 2 .92 | *id.* |
| | bâtardes | | 1 .30 | 1 .62 | *id.* |
| | d'appartement à 2 vantaux. | Largeur | 1m.30 | 1m.46 | 1m.62 |
| | | Hauteur | 2 .27 | 2 .60 | 2 .92 |
| | d'appartement à 1 vantail.. | Largeur | 0 .73 | 0 .81 | 0 .89 |
| | | Hauteur | 1 .95 | 2 .27 | 2 .44 |

La hauteur des appartements étant successivement :

2m,27 2m,60 2m,92 3m,25 3m,90 et 5m,50 à 5m,85,

la hauteur des lambris d'appui est respectivement :

0m,76 0m,84 0m,86 0m,89 0m,97 1m,06.

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Largeur des croisées | grandes | 1m.62 à 1m.79 | Hauteurs des | appuis | 0m.89 à 1m.06 | |
| | moyennes | 1 .46 1 .54 | | baguettes | 0 .35 | 0 .41 |
| | petites | 1 .14 1 .30 | | balcons | 0 .54 | 0 .65 |
| Châssis à tabatière pour les combles | | Hauteur | 0m.81 | 0m.97 | 1m.14 | 1m.30 |
| | | Largeur | 0 .65 | 0 .73 | 0 .81 | 0 .97 |

**497.** *Salles.* Pour les grandes salles de réunion, le rapport de la hauteur à la largeur est :

1° Pour les salles voutées, la largeur étant prise dans la nef, de. . . . . 1 à 1,5
2° Pour les salles rondes voûtées. . . . . 1
3° Pour les salles oblongues couvertes d'un plafond. . . . . 1
4° Pour les salles carrées couvertes d'un plafond, moins de. . . . . 1

La hauteur des salles d'habitation varie de moins de la moitié de la largeur à une fois cette largeur.

**498.** *Galeries.* Lorsque la longueur d'une salle dépasse deux fois la largeur, elle prend le nom de galerie, et lorsque la longueur d'une galerie est très-grande par rapport à la largeur, on la divise en travées, soit par des arcs doubleaux soutenus à l'aide de pilastres ou de colonnes, soit par tout autre moyen. Plusieurs galeries du Louvre offrent des exemples de ce genre de division.

**499.** *Salles à manger et tables, salles de billard, salons, chambres à coucher, etc.* La largeur d'une table à manger est ordinairement de 1m,30. Quelquefois on lui donne 2m,00; mais alors on place au milieu un surtout. Dans tous les cas, elle se termine à chaque extrémité par un demi-cercle. Pour que les domestiques circulent facilement autour de la table, la distance qui la sépare des murs de la salle doit être de 0m,90 à 1m,00 à ses extrémités, et de 1m,25 à 1m,35 latéralement.

Pour une salle de billard, il faut un espace de 2 mètres entre le billard et les murs de la salle.

*Superficies en mètres carrés des différentes pièces qui composent un appartement* (M. Mandar).

| | PETITS. | MOYENS. | GRANDS. |
|---|---|---|---|
| Salons. . . . . | 15.19 à 22.79 | 34.19 à 45 58 | 56.98 à 68.38 et jusqu'à 79.77 |
| Salles. . . . . | 13.30 18.99 | 28.49 37.99 | 45.58 56.98 68.38 |
| Chambres à coucher. . | 11.40 15.20 | 24.69 30.39 | 37.99 45.58 56 98 |
| Cages d'escaliers.. . . | 9 50 13 30 | 18.99 24.69 | 30.39 37.99 45.58 |
| Antichambres, vestibules. . . . . | 7.60 11.40 | 15.20 18.99 | 24.69 30 39 37,99 |
| Cabinets. . . . . | 5.70 7.60 | 11.40 15.20 | 18.99 22.79 30.39 |

**300.** *Cheminées.* La mode de placer des glaces sur les cheminées a fait diminuer de jour en jour leurs dimensions. Les plus grandes n'ont que $1^m,95$ de largeur sur $1^m,30$ de hauteur; souvent celles des petits appartements n'ont que $1^m,25$ de largeur sur $1^m,00$ de hauteur, et on en fait qui n'ont que $0^m,80$ sur $0^m,80$. La largeur des jambages et du manteau est le 1/10 environ de la largeur de la cheminée; ainsi, pour les premières, elle est de $0^m,195$; pour les secondes, $0^m,125$, et pour les plus petites, $0^m,08$. La profondeur varie de $0^m,45$ à $0^m,80$ (n° 332).

*Proportions des cheminées, suivant les dimensions des pièces où elles se trouvent.*

| | PIÈCES | | |
|---|---|---|---|
| | petites. | moyennes. | grandes. |
| Largeur dans œuvre. . . . . | $0^m.81$ à $0^m.97$ | $1^m.14$ à $1^m.30$ | $1^m.62$ à $1^m.95$ |
| Hauteur de la tablette. . . . | 0 .89 0 .97 | 0 .97 1 .03 | 1 .14 1 .30 |
| Largeur de la tablette. . . . | 0 .27 0 .32 | 0 .35 0 .38 | 0 .40 0 .43 |

**301.** *Escaliers.* Afin que l'on ne se fatigue pas trop en montant un escalier, la distance verticale de deux paliers successifs ne doit pas dépasser $2^m,50$ à $3^m,00$.

La hauteur de la rampe varie de $0^m,89$ à $1^m,06$.

La longueur des marches varie de $1^m,62$ à $1^m,95$ pour les grands escaliers, de $1^m,30$ à $1^m,46$ pour les moyens, de $0^m,97$ à $1^m,14$ pour les petits, et de $0^m,65$ à $0^m,81$ pour ceux de dégagement.

La hauteur des marches est moyennement égale à la moitié du giron; elle varie de $0^m,13$ à $0^m,19$, mais en sens inverse du giron.

On peut déterminer la hauteur ou la largeur des marches d'escaliers

quand l'une de ces dimensions est connue à l'aide de la formule empirique

$$2h + l = 0^m,65.$$

$h$ hauteur de la marche;
$l$ largeur du giron;

Si $h = 0$, on a $l = 0^m,65$, qui est le pas d'infanterie (39).
Si $l = 0$, on a $h = 0^m,325$, qui est l'espacement des échelons d'une échelle.

Faisant successivement dans la formule précédente $l$ égale à

$0^m,27$ $0^m,30$ $0^m,32$ $0^m,35$ et $0^m,38$

on en conclut respectivement pour $h$ :

$0^m,19$ $0^m,175$ $0^m,165$ $0^m,15$ $0^m,135$;

valeurs qu'il convient d'adopter dans la pratique.

**302.** *Fourneaux potagers et fours à cuire le pain.* Les fourneaux potagers ont de $0^m,76$ à $0^m,85$ de largeur sur autant de hauteur.

Le diamètre des fours varie de $0^m,89$ à $0^m,97$ pour les petits, de $1^m,14$ à $1^m,30$ pour les moyens, et de $1^m,46$ à $1^m,62$ pour les grands. L'âtre du four s'établit à $0^m,89$ ou $0^m,97$ au-dessus du sol. La voûte ou chapelle s'élève de $0^m,35$ à $0^m,45$ au-dessus de l'âtre.

Les fours de manutention ont de $3^m,25$ à $3^m,90$ et même $4^m,20$ de diamètre.

**303.** *Cours.* Pour qu'un carrosse puisse tourner sans difficulté, une cour doit avoir au moins $7^m,80$ de côté.

**304.** *Composition de quelques maisons d'habitation, et dimensions de leurs différentes pièces.* Les dimensions des maisons rurales sont extraites de la Maison rustique du XIX$^e$ siècle.

1° *Maison de journalier à un simple rez-de-chaussée.*

Figure 2, planche II. Plan de la maison.

A cuisine dans laquelle on entre du dehors (4 mètres sur 4 mètres);
B chambre à coucher à deux lits (4 mètres sur 3 mètres);
C chambre à coucher d'enfant (4 mètres sur 2 mètres);
D petite buanderie, avec porte sur le derrière (3 mètres sur 1 mètre);
E petit garde-manger;
F latrines, sous appentis;
G petit bûcher, ou lieu fermé pour conserver les outils.

La maison a 8 mètres de largeur sur 5 mètres de profondeur dans œuvre, c'est-à-dire non compris les épaisseurs des murs, et une hauteur de 3 mètres, mesurée à la naissance du toit.

2° *Maison de journalier avec rez-de-chaussée et un étage au-dessus.*

Figure 3, planche II. Plan du rez-de-chaussée.

A cuisine par laquelle on entre du dehors (5 mètres sur 5 mètres);
B buanderie (3 mètres sur 3 mètres);

C petit garde-manger (2 mètres sur 1 mètre) ; devant est un petit espace où l'on peut loger quelques outils ;
D escalier pour monter à l'étage supérieur, et sous lequel on peut placer une petite provision de bois ;
O latrines placées sous un petit appentis.

Figure 4, planche II. Plan du premier étage.

E chambre à coucher à deux lits et un lit d'enfant, avec cheminée ;
F autre chambre à coucher ;
H armoire ou tambour fermé.

La maison a 8 mètres de largeur sur 5 mètres de profondeur dans œuvre, et 6 mètres de hauteur sous la naissance du toit.

3° *Maison double de journalier avec étage au-dessus et dépendances.* Cette disposition donne des habitations plus chaudes et plus économiques que la précédente.

Figure 5, planche II. Plan du rez-de-chaussée.

A porche avec armoire ou rayons pour les outils ;
B cuisine (5 mètres sur 4 mètres) ;
C arrière-cuisine avec four ou buanderie (3 mètres sur 3 mètres) ;
D garde-manger un peu enfoncé en terre, et en partie sous l'escalier E ;
F bûcher ;
O petit cellier ;
H latrines ;
L toit à porcs, à double mur, pour éviter les infiltrations ; au-dessus se trouve un poulailler.

Figure 6, planche II. Plan du premier étage.

M chambre à coucher à un lit ;
N chambre à coucher à deux lits.

Le bâtiment a 8 mètres de profondeur dans œuvre ; il a 16 mètres de face au rez-de-chaussée, 8 mètres pour chaque habitation. Au 1er étage, la face n'a plus que 8 mètres, 4 mètres pour chaque habitation ; les dépendances, qui ont 3 mètres de largeur, sont disposées sous appentis de chaque côté du corps principal du bâtiment. Le corps principal a 6 mètres de hauteur depuis la naissance du toit. Les dépendances ont 3 mètres de hauteur.

4° *Maison d'éclusier* (canal du Centre). Elle est destinée à loger la famille de l'éclusier, à recevoir les produits d'un jardin, et à placer une vache et un cochon.

Figure 7, planche II. Plan du rez-de-chaussée.

A pièce d'entrée à cheminée, contenant un lit, et pouvant servir de salle à manger (5 mètres sur 4 mètres) ;
B chambre à coucher contenant deux lits (5 mètres sur 3 mètres) ;
C pièce dans laquelle communique le four ; elle peut servir à la fois de cuisine et de salle à manger (3 mètres sur 4 mètres) ;
D four de 1m,60 de diamètre ;

E escalier pour descendre à la cave, qui est un berceau régnant sous toute la profondeur de la maison, et qui a 3m,10 de largeur sur 2m,30 de hauteur à la clef;
F escalier pour monter au grenier, qui occupe tout le premier étage, et que l'on peut disposer, au besoin, pour recevoir des lits;
GG appentis de 3 mètres sur 5 mètres et 2m,50 de hauteur, servant, l'un de magasin, et l'autre d'écurie pour recevoir deux vaches et deux cochons.

Le rez-de-chaussée a 2m,60 de hauteur; la porte d'entrée a 0m,90 de largeur et les fenêtres 0m,80; le grenier a 2 mètres de hauteur sous le faîte, il est éclairé par des lucarnes rectangulaires placées dans les murs, à l'aplomb de la porte et des fenêtres du rez-de-chaussée.

La maison a 8 mètres de largeur sur 7 mètres de profondeur dans œuvre.

5° *Habitation et dépendances pour un petit cultivateur exploitant 2 à 3 hectares de terre, exerçant un art agricole et mettant ses récoltes en meules.*

Figure 8, planche II. Plan du rez-de chaussée.

La partie *abcd* est surmontée d'un étage distribué comme le rez-de-chaussée, et contenant les chambres à coucher. Les parties latérales *adef* et *bcgh* sont des appentis dont la naissance s'élève au niveau du premier étage. Les combles du corps principal et des appentis, qui ont une assez forte pente, sont encore disposés en greniers, et, au besoin, dans les combles du corps principal, on peut placer des chambres de domestiques.

A porche d'entrée;
B bûcher;
C cuisine (6 mètres sur 6 mètres);
D atelier pour placer un métier ou autre machine (4 mètres sur 9 mètres);
E arrière-cuisine ou buanderie (3 mètres sur 4 mètres);
F escalier conduisant au premier étage;
O garde-manger;
I magasin à fourrage (3 mètres sur 2m,50),
K étable pour deux ou trois vaches (3 mètres sur 4 mètres);
L laiterie (3 mètres sur 4 mètres); au-dessus de la laiterie et de l'étable se trouve le magasin à paille;
M magasin aux outils et instruments, et servant aussi de cellier (3 mètres sur 4 mètres);
N magasin aux racines, servant aussi d'aire à battre (3 mètres sur 4 mètres); au-dessus sont des greniers;
V réduit pour deux ou trois porcs (2 mètres sur 2 mètres);
P latrines;
R poulailler.

Le corps principal *abcd* a 10 mètres de largeur sur 9 mètres de profondeur et 6 mètres de hauteur.

La cuisine et l'atelier sont élevés à 0m,50 au-dessus du sol; le magasin à fourrages, la buanderie, l'étable et la porcherie sont au niveau du sol; la laiterie, le cellier et le magasin aux racines sont un peu au-dessous.

6° *Petite maison de ferme pour un propriétaire-cultivateur exploi-*

*tant* 10 *à* 12 *hectares de terre à froment de première classe, et mettant ses récoltes en meules.*

Figure 9, planche II. Plan du rez-de-chaussée de toute la ferme.

A espace couvert par un petit toit en forme de fronton, reposant sur les deux poteaux *dd'*;
D cuisine par laquelle on entre (4 mètres sur 5 mètres);
F arrière-cuisine ou buanderie, avec escalier pour monter au premier étage (2 mètres sur 3 mètres);
E garde-manger (1 mètre sur 1 mètre);
G salle à manger ou de réception (3m,50 sur 4 mètres).
I cabinet du fermier (3m,50 sur 4 mètres).

La partie *a a' a'' a'''* forme le bâtiment d'habitation, qui a un premier étage pour recevoir le maître et sa famille pendant la nuit; les domestiques peuvent coucher dans les combles, qui sont très-élevés et forment en quelque sorte un second étage. Ce bâtiment central a 8 mètres de largeur sur 7 de profondeur, et 6 mètres de hauteur sous les naissances du toit.

Sous tout le bâtiment central se trouve un étage souterrain auquel on descend par l'escalier B. Cet étage souterrain comprend un fournil placé sous la salle G, un cellier aux boissons placé sous la cuisine D, la masse du four se trouve dans l'angle de ce cellier; enfin, deux celliers aux racines placés, l'un sous le cabinet I, et l'autre sous les parties E, F, H.

K hangar aux voitures (4 mètres sur 4 mètres);
L laiterie (3 mètres sur 4 mètres);
M échaudoir pour la laiterie (4 mètres sur 1m,50);
N étable pour cinq à six vaches (9 mètres sur 4 mètres);
O porcherie;
P latrines;
V magasin à foin (5 mètres sur 4 mètres);
R sellerie, hache-paille, coffre à avoine (2m,50 sur 4 mètres);
S écurie pour deux chevaux (4 mètres sur 4 mètres);
T aire à battre avec grenier au-dessus (7 mètres sur 4 mètres);
U basse-cour; la partie couverte est divisée en compartiments, l'autre partie n'est pas couverte.

Les magasins à paille sont au-dessus de la laiterie, de la sellerie et de l'écurie. Les combles des bâtiments latéraux sont très-inclinés et à deux pans, ce qui permet d'y placer les greniers et magasins.

Z puits ou pompe;
Y tas de fumier,
X fosse à purin.

Au delà du fumier sont rangées les meules de récoltes.

7° *Bâtiments d'habitation et d'exploitation pour une ferme en pays de plaine, où on exploite* 34 *hectares en terres à froment de première*

*classe, et où on récolte, terme moyen, dans un assolement de cinq années,* 390 *hectolitres de froment et* 210 *d'orge, semence déduite,* 1060 *quintaux métriques de paille et autant de foin. Les bêtes de trait sont trois chevaux de taille moyenne; les bêtes de rente, nourries constamment à l'étable, sont vingt vaches du poids de* 350 *à* 400 *kilog., un taureau, quatre veaux, six porcs et des oiseaux de basse-cour. Une partie des récoltes des céréales seule est engrangée, l'autre est mise en meules.*

Figure 10, planche II. Plan du rez-de-chaussée de tous les bâtiments.

La maison d'habitation occupe la partie $a\ a'\ a''\ a'''$; elle a un premier étage pour recevoir le personnel de la ferme pendant la nuit. On peut, au besoin, faire des chambres à coucher de domestiques dans les combles.

*m* cuisine (5 mètres sur $5^m,50$);
*n* arrière-cuisine servant de fournil et d'échaudoir pour la laiterie, elle contient l'escalier qui conduit à l'étage supérieur (3 mètres sur 5 mètres);
*p* salle de réception ou à manger ($4^m,25$ sur 4 mètres);
*q* cabinet du fermier ($4^m,25$ sur 4 mètres).

Sous ce rez-de-chaussée se trouve un étage demi-souterrain, composé :

1° D'une laiterie voûtée de 5 mètres sur $4^m,50$, placée sous l'arrière-cuisine *n* et une partie de la cuisine *m;* on descend à la laiterie par l'escalier *r* situé sous le hangar A. La laiterie est garnie de tables en pierre et dallée; un dégorgeoir, communiquant avec un puisard, produit l'écoulement des eaux;

2° D'un cellier aux boissons et au charbon, placé sous le cabinet *q;*

3° De deux celliers aux racines et aux pommes de terre, placés, l'un sous la cuisine *m*, et l'autre sous la salle à manger *p*, on descend aux celliers par l'escalier voûté *s*.

A petit hangar, par lequel on entre dans l'arrière-cuisine et descend à la laiterie; il sert à faire sécher les ustensiles de celle-ci (4 mètres sur $1^m,50$);
B garde-manger ($1^m,50$ sur $1^m,50$);
C étable pour les vaches qui vêlent, malades ou à l'engrais, et un taureau (4 mètres sur 6 mètres);
D étable pour vingt-quatre vaches (14 mètres sur $6^m,50$);
E étable pour quatre veaux (2 mètres sur 3 mètres);
F réduit pour les ustensiles de pansement des vaches;
G magasin ou hangar à foin (9 mètres sur 4 mètres);
H toits à porcs; I latrines pour les hommes (6 mètres sur 5 mètres);
K écurie pour trois chevaux (6 mètres sur 4 mètres);
L sellerie, hache-paille, coffre à avoine (6 mètres sur 2 mètres);
M hangar pour les voitures et instruments (8 mètres sur 6 mètres);
N grange (10 mètres sur 6 mètres);
O basse-cour;
P bûcher;
Q latrines pour le fermier et les servantes;
R niche à chien;
SSS réservoirs à urines;
T puits ou citernes, avec auge pour abreuver les animaux.

Le tas de fumier et la fosse à purin sont placés en dehors, devant les étables. Les

meules de récoltes sont également placées en dehors et en vue de la maison d'habitation.

L'étage souterrain a $2^m,50$ de hauteur, le bâtiment d'habitation 6 mètres, les étables et les écuries 4 mètres, la grange et le magasin à fourrages 5 mètres.

Toute la superficie du terrain occupé par l'établissement est de 7 ares ou 700 mètres carrés; la façade a 24 mètres de longueur, et la profondeur est de $29^m,50$.

Le bâtiment d'habitation couvre 100 mètres carrés, et les bâtiments d'exploitation 400, en tout 500 mètres carrés ou 5 ares. Le magasin à foin et les greniers au-dessus des étables, des écuries et des hangars présentent une capacité de 400 mètres cubes, ce qui est suffisant pour loger les fourrages nécessaires pour quatre mois d'hivernage.

8° *Maison de ville composée d'un rez-de-chaussée et d'un premier, pour une seule famille.* On suppose, comme cela a lieu généralement, que l'on ne peut prendre jour que sur deux faces.

Figure 11, planche II. Plan du rez-de-chaussée.

A cage de l'escalier ($5^m,70$ sur $2^m,75$);
A′ vestibule et antichambre ($5^m,70$ sur $2^m,50$);
B office ($3^m,70$ sur $2^m,75$);
C cuisine ($5^m,30$ sur $3^m,70$);
D salle à manger ($5^m,30$ sur $7^m,70$);
E buffet;
E′ serre;
F salon (8 mètres sur $7^m,70$);
G chambre à coucher ($5^m,30$ sur 6 mètres, comptés du devant de l'alcôve);
H garde-robe;
H′ dégagement avec escalier pour monter à un petit entre-sol placé au-dessus des cabinets;
I cabinet de toilette;
K armoires.

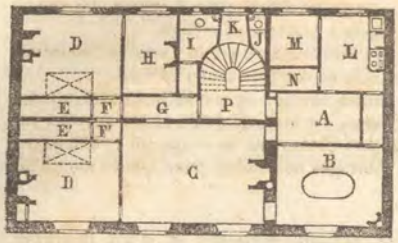
Le vestibule au rez-de-chaussée, et le palier de l'escalier dans les étages supérieurs doivent, autant que possible, donner entrée à la cuisine et à l'antichambre ou pièce d'introduction, et il conviendrait que l'antichambre communiquât directement avec la salle à manger, le salon et la chambre à coucher, afin de rendre toutes les pièces de l'appartement indépendantes les unes des autres.

Figure 12, planche II. Plan du 1$^{er}$ étage.

L antichambre;
MMMM chambres à coucher;
NNN chambres de domestiques;
PPP cabinets;
OO cabinets d'aisances;
R escalier conduisant au grenier.

9° M. Moitié, de Coulommier, architecte, nous communique *le plan d'un appartement de ville pour une famille d'une certaine aisance*, qu'il a disposé dans une maison qu'il vient de faire construire à Paris, et qui paraît réunir toutes les commodités désirables. La figure 80 représente ce plan à l'échelle de 3 millimètres pour mètre.

Fig. 80.



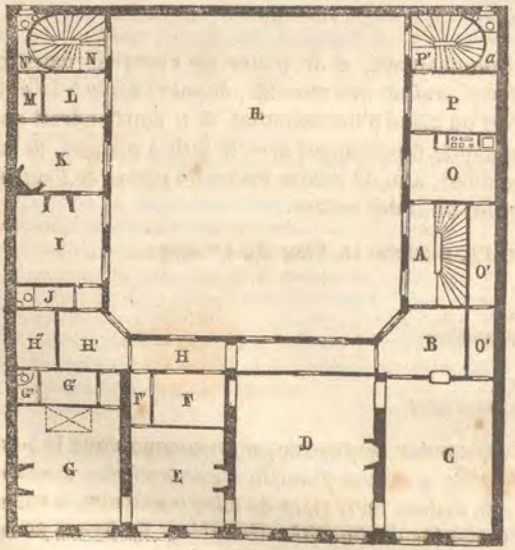

P palier (1m,20 sur 2m,80);
A antichambre (3m,55 sur 2m,30);
B salle à manger (3m,50 sur 4m,50);
C salon (4m,50 sur 6m,15);
DD chambres à coucher (4m,35 sur 3m,65);
EE′ garde-robes (0m,80 sur 3m,15);
FF′ dégagements;
G couloir (1 mètre sur 3m,15);
H cabinet de travail ou chambre à coucher d'enfant (3m,45 sur 2m,40);
I lieux à l'anglaise;
J cabinet d'aisances pour les domestiques;
L cuisine (2m,75 sur 3m,30);
M office (1m,80 sur 2m,20);
N garde-manger (1m,80 sur 1 mètre);

Un passage de 0m,80 est destiné au service de la salle à manger;

K tambour à jour dans toute la hauteur, pour aérer l'escalier, en permettant aux croisées de s'ouvrir. A chaque étage le plancher est profilé, ce qui forme des banquettes destinées à recevoir des corbeilles de fleurs.

10° M. Moitié nous communique également le plan d'un appartement de ville disposé pour une famille riche. La figure 81 en représente la disposition à l'échelle de 3 millimètres pour mètre.

Fig. 81.




A escalier principal (2m,50 sur 4m,50);
B antichambre (4 mèt. sur 3 m.);
C salle à manger (4m,50 sur 6m,90). Un poêle, placé dans la cloison, chauffe la salle à manger et l'antichambre;
D salon (6 mètres sur 7 mètres);
E boudoir de madame ou petit salon (4 mètr. sur 4m,30);
F cabinet dans lequel on pourra mettre un lit de repos ou prendre des bains (3 mètres sur 2m,50);

F' dégagement;
G chambre à coucher de madame (4m,50 sur 5m,30);
G' garde-robes;
G'' anglaises;
H galerie de dégagement;
H' cabinet de toilette;
H'' atrium ou petite cour donnant de la lumière et de l'air aux cabinets d'aisances;

*L'aile de gauche forme l'appartement de Monsieur :*

I chambre à coucher (3m,60 sur 4 mètres);
J garde-robes et aisances;
K cabinet de travail (3m,60 sur 3 mètres);
L antichambre (2m,25 sur 2 mètres);
M cartonnier;
N escalier de service;
N' aisances pour les gens.

*Si l'aile de gauche était destinée à des enfants :*

I serait la chambre à coucher;
K la salle d'étude;
L la chambre de la gouvernante;
M un cabinet.

*Aile de droite :*

O cuisine (3m,60 sur 2m,80);
O' couloir de 1 mètre pour le service de la salle à manger;
P office (3m,60 sur 2m,50);
P' escalier de service;
*a* aisances pour les gens;
R grande cour.

11° *Maison de campagne projetée par Mandar, pour être construite sur le penchant d'un coteau; ce qui a permis de mettre le premier étage au niveau de la cour, du côté de la montagne, et le rez-de-chaussée au niveau du jardin sur les trois autres faces de la maison.* Le bâtiment principal est un pavillon carré de 11m,70 de côté. Le rez-de-chaussée a 2m,65 de hauteur, non compris l'épaisseur du plancher, qui est de 0m,38; le premier a 3m,17 et son plancher 0m,35, le second 2m,92 et son plancher 0m,30, le troisième 2m,44 et son plancher 0m,27.

Figure 13, planche II. Plan du premier étage.

A côté de la cour;
A' côté faisant face au jardin;
B vestibule par lequel on entre du côté de la cour;
B' escalier conduisant aux étages supérieurs; il est éclairé par le toit, qui est surmonté d'un belvéder;
C salle à manger dans laquelle est un poêle.

Pour une maison de ville, il faudrait éviter de passer directement du vestibule dans la salle à manger.

DD buffets ;
E salon (3m,90 sur 9 mètres) ;
F second vestibule par lequel on entre du côté du jardin ;
G chambre à coucher principale (3m,90 sur 5m,85) ;
H cabinet de toilette (1m,46 sur 2m,90) ;
I boudoir contenant un canapé (2m,03 sur 3m,25). La cheminée, ainsi que celles du salon et de la chambre à coucher, sont placées sous les appuis des fenêtres ;
K lieux à l'anglaise (1 mètre sur 1m,46) ; il y en a d'autres placés dans les angles de l'escalier ;
L chambre de domestique (1m,80 sur 3m,25) ;
M terrasse placée au niveau du premier étage, et régnant sur toute la façade du côté du jardin (largeur, 1m,90) ;
N escalier à double rampe pour descendre de la terrasse au jardin ;
N'N' escaliers pour descendre de la cour dans le jardin sans passer par la maison.

Le rez-de-chaussée contient :

1° Une cuisine placée sous la salle à manger C ; elle communique au dehors par une porte placée au pied de l'escalier N'. Un escalier, qui débouche sous l'escalier B' du premier étage, établit une communication intérieure entre le premier étage et le rez-de-chaussée, et facilite le transport des plats, de la cuisine à la salle à manger ;
2° Une office et des dépendances de la cuisine, placées sous le salon E ;
3° Une salle de bain sous le vestibule F ;
4° Une salle de billard sous la chambre à coucher G et le cabinet de toilette H ; elle communique au dehors par une porte placée au pied de l'escalier N' ;
5° Une cave sous le boudoir I et la chambre de domestique L ;
6° Une grotte sous la terrasse.

Figure 14, planche II. Plan du deuxième étage.

M antichambre ;
OO couloir de 0m,81 de largeur ;
PPPP chambres contenant chacune une alcôve de 2m,10 sur 1m,13 ;
QQQ cabinets de toilette.

Le troisième étage est distribué comme le deuxième, à cela près que l'on diminue le cabinet placé au-dessus du vestibule pour prendre les lieux à l'anglaise.

Au premier, les cheminées sont placées en face des fenêtres ; au deuxième, elles sont dans les entr'axes, et au troisième dans les angles des pièces.

La grille d'entrée dans la cour A se trouve en face du bâtiment principal, et tous les bâtiments accessoires : logement du jardinier et ses dépendances, basses-cours, écuries, remises, étables, laiterie, poulailler, colombier, volière, sont disposés autour de la cour. Derrière les bâtiments accessoires, à droite, quand de l'extérieur on entre dans la cour, se trouve le jardin fleuriste, en avant duquel, sur l'alignement du pavillon principal, est placée l'orangerie.

305. *Bains.* A l'établissement des bains Saint-Sauveur, rue Saint-Denis, à Paris, les cabinets ont 3m,15 de longueur, 1m,56 de largeur, et

$2^m,30$ de hauteur au rez-de-chaussée, $2^m,16$ au premier et $2^m,28$ au second. Les corridors, dans lesquels ouvrent tous les cabinets, ont $2^m,60$ de largeur et une hauteur égale à celle des cabinets. Il conviendrait, pour que la vapeur ne se déposât pas sur les habillements des baigneurs, que chaque cabinet fût divisé en deux parties séparées, l'une pour la toilette et l'autre pour le bain (338).

306. *Salle de spectacle.* Pour que les spectateurs ne soient pas gênés, il faut compter sur un espace de $0^m,50$ en largeur et $0^m,75$ en longueur, c'est-à-dire que la distance d'axe en axe de deux banquettes consécutives doit être de $0^m,75$.

Pour que tous les spectateurs voient bien ce qui se passe sur la scène, le parterre doit aller en s'élevant de $0^m,10$ à $0^m,13$ par banquette, et pour les galeries, une droite s'appuyant sur les arêtes des banquettes doit venir rencontrer l'arête de l'avant-scène, et même passer au-dessous si cela est possible.

La largeur des couloirs doit être de 2 mètres au moins; elle va à 3 mètres et même plus quand chaque galerie contient un grand nombre de spectateurs, et qu'il n'y a que deux escaliers pour descendre.

307. *Magasins à blé.* Pour conserver le blé, on l'étale en couches sur les planchers des divers étages du magasin. L'épaisseur des couches est de $0^m,50$ pour le blé d'un an, de $0^m,60$ pour celui de deux ans, et de $0^m,70$ pour celui de trois. On laisse entre les couches et le mur un espace libre de 1 mèt. de largeur, et dans le sens de la longueur, tous les 15 à 20 mèt., on interrompt les couches sur une distance de 4 à 5 mèt., cela permet de changer le blé de place pour l'aérage.

Dans les grandes villes, on établit des magasins à blé qui ont jusqu'à huit étages, y compris les combles et le rez-de-chaussée, que l'on utilise comme les autres étages. La hauteur de chaque étage est de 3 mètres; cela suffit pour aérer le blé, auquel on fait décrire, en le lançant à la pelle, une courbe dont la hauteur est de $2^m,50$. La longueur des greniers dépend de leur importance, et leur largeur varie de 12 mèt. au minimum, à 20 mèt. au maximum.

On calcule les dimensions des murs et des poteaux pour résister au poids du blé emmagasiné. Le blé pèse moyennement 75 kil. l'hectolitre (210).

Les poteaux soutenant les planchers sont espacés de 4 à 5 mètres, et, afin d'éviter le tassement provenant de la dessiccation du bois, on place les poteaux des divers étages bout à bout, sans les interrompre par des pièces de bois posées à plat. La dessiccation ne change pas la longueur des pièces de bois, au lieu que normalement aux fibres, le sapin diminue de 1/75, et le chêne de 1/83. Le bois du balancier de l'ancienne machine à vapeur de Chaillot, dont la dessiccation s'est opérée à une température assez élevée, a diminué, d'après M. Mary, de 1/33.

308. *Écuries.* L'espace occupé par un cheval est de $2^m,60$ en lon-

gueur, sur $1^m,30$ à $1^m,45$ en largeur, quand une simple barre de bois le sépare de son voisin ; s'il en est séparé par une cloison, cette largeur varie de $1^m,50$ à $1^m,70$ ; les largeurs sont comptées entre les barres ou cloisons de séparation. Pour un seul rang de chevaux, la largeur de l'écurie est de $4^m,30$, ce qui donne un passage de $1^m,70$ derrière les chevaux. La largeur de l'écurie est portée à $8^m,60$, s'il y a deux rangs de chevaux, avec un passage le long de chaque mur, c'est-à-dire si les chevaux d'un rang font face à ceux de l'autre, et elle est de $7^m,70$ si les chevaux font face aux murs, c'est-à-dire s'il n'y a qu'un passage entre les deux rangs.

La hauteur des écuries est suffisante quand elle atteint 3 mèt. ; très-souvent on la porte à $3^m,80$.

D'après M. Nadault de Buffon, il convient de limiter la hauteur des écuries à 3 mèt., et de porter leur largeur à $4^m,50$ ou mieux 5 mèt. ; dimensions qu'il conseille également d'adopter pour les étables.

La mangeoire a son arête supérieure à $1^m,10$ au-dessus du sol ; sa profondeur est de $0^m,25$, et sa largeur de $0^m,30$ en haut et $0^m,20$ au fond.

Le râtelier a son arête inférieure à $1^m,70$ au-dessus du sol, et son arête supérieure à $2^m,20$. Son inclinaison est telle, qu'avec ces hauteurs, sa largeur est de $0^m,65$. Ses fuseaux sont écartés de $0^m,08$ à $0^m,13$.

Les fenêtres sont demi-circulaires, leur diamètre est de $0^m,90$ à 1 mèt. ; on les place à $1^m,70$ ou $1^m,80$ au-dessus du sol, et le moins possible en face des chevaux, afin que la lumière ne leur arrive pas directement sur les yeux. Les écuries doivent être convenablement éclairées (129).

Pour la santé des chevaux, l'air d'une écurie doit pouvoir se renouveler facilement à l'aide de nombreuses ouvertures pratiquées dans le haut des murs en regard, et disposées de manière que les chevaux ne soient pas dans les courants d'air qui s'établissent. Des ouvertures pratiquées dans le bas des murs faciliteraient beaucoup le renouvellement de l'air. Il convient du reste de pouvoir fermer ces ouvertures à volonté.

Le sol des écuries doit être solide, afin qu'il résiste aux pieds des chevaux ; tout à fait imperméable, pour que les urines ne s'y infiltrent pas, et légèrement incliné sous les chevaux, afin que les urines s'écoulent facilement vers les rigoles pratiquées pour leur donner écoulement hors de l'écurie. Les pavés en grès et les madriers en bois conviennent à la confection du sol des écuries.

Les portes d'écuries ou d'étables ne doivent pas avoir moins de $1^m,20$ de largeur sur $2^m,20$ à $2^m,40$ de hauteur, afin que les chevaux harnachés ou les vaches pleines puissent facilement y passer ; elles sont à deux vanteaux.

309. *Étables.* Une vache, plutôt grosse que petite, nourrie constamment à l'étable ou en partie au pâturage, exige un espace de $1^m,50$ en

largeur, sur $2^m,40$ à $2^m,60$ en longueur, y compris l'auge et le râtelier. Un bœuf de trait, plutôt fort que de petite taille, exige un espace de $1^m,35$ en largeur sur $2^m,40$ à $2^m,60$ en longueur, et un bœuf d'engrais de forte taille, le même espace que les vaches. Un passage de 1 mètre est suffisant derrière les bêtes à cornes. La hauteur qu'il convient de donner aux étables est de 3 mètres, on la porte souvent à $3^m,50$.

Comme pour les écuries (508), il convient de pratiquer dans les murs des ouvertures pour faciliter l'aérage. Il convient également que les étables soient suffisamment éclairées.

Des rigoles pratiquées derrières les animaux donnent un écoulement facile aux urines. Le sol des étables doit être incliné de $0^m,01$ par mètre vers ces rigoles, et élevé de $0^m,20$ au-dessus du sol environnant. Il convient de le faire en pavés larges, pour que les pieds des vaches y reposent facilement; les dalles, les briques, les planches, une couche de béton ou de ciment hydraulique sont les matériaux qu'il convient d'employer, au moins pour la place où se tient le bétail.

**510.** *Bergeries.* Les moutons de forte taille, dont 1/4 à 1/5 en brebis portières, et qui ne sont soumis à la tonte qu'une fois par an, exigent $0^m,41$ de longueur de râtelier chacun, et occupent, en moyenne, $1^{mq},05$ de surface. Ceux qui sont tondus deux fois par an exigent $6^m,35$ de râtelier et $0^{mq},95$ de surface. Les agneaux de 4, 6 ou 9 mois exigent respectivement $0^m,24$, $0^m,27$ et $0^m,30$ de râtelier. On comprend dans l'estimation de la surface convenable à chaque bête, l'espace nécessaire aux râteliers, aux cloisons de séparation, au passage et aux agneaux.

Les portes et les fenêtres d'une bergerie doivent être vastes, le sol et le bas des murs doivent être cimentés et imperméables. Il serait convenable qu'il y eût, auprès de la bergerie, une petite cour où les moutons pussent aller prendre l'air à volonté. Du reste, il convient, comme pour les étables, de disposer, vers le haut et vers le bas des murs, des ouvertures qui renouvellent constamment l'air de la bergerie. Un magasin de 4 mètres de largeur, sur 12 à 13 mètres de longueur et $4^m,50$ de hauteur suffit au service journalier des fourrages et racines pour 500 à 800 bêtes, et pendant le temps de la tonte pour tous les travaux de cette opération.

La hauteur d'une bergerie varie de $2^m,60$ à 3 mètres; elle atteint même quelquefois 4 mètres. Les râteliers sont élevés à $0^m,40$ ou $0^m,60$ au-dessus du sol; ils sont inclinés en sens contraire de ceux des chevaux, afin que la poussière ne tombe pas sur les animaux, ce qui nuirait à leur santé et gâterait leur toison. Une petite auge en voliges, fixée au bas du râtelier, retient les parties de nourriture qui peuvent s'en échapper, et permet d'incliner le râtelier en avant, disposition qui rend plus facile aux moutons d'atteindre les dernières parties de fourrage qui s'y trouvent.

**511.** *Porcheries.* Pour une forte truie, il faut compter sur 3 mètres

carrés à $3^{mc},50$ de surface; pour un verrat, sur 2 mètres carrés à 3 mètres carrés; pour un cochonneau, jusqu'à six mois, sur 1 mètre carré, et au-dessus de cet âge, sur $1^{mc},35$ à $1^{mc},50$.

On doit changer souvent la litière d'une porcherie, et faciliter l'écoulement des eaux en inclinant le sol, que l'on doit faire en dalles ou en bois, afin que les porcs ne puissent pas l'attaquer.

Le porc est le seul animal qui, dans les basses-cours ou dans les écuries, a conservé assez d'instinct de propreté pour ne déposer jamais volontairement ses excréments sur la litière où il repose. Le cheval, le bœuf, le mouton satisfont leurs besoins où ils se trouvent; s'ils sont couchés, ils ne se lèvent point pour fienter, et dorment sur leurs ordures. Le porc, au contraire, quand il est libre dans sa loge, choisit toujours la place la plus éloignée, et si on essaye de l'attacher, il se recule autant que sa longe le lui permet.

**312.** *Laiterie et colombier.* La température de la laiterie doit être de 15° à peu près, en été comme en hiver. La plus grande propreté doit y régner.

Le colombier est généralement une tour ronde ou polygonale, dans laquelle on dispose des nids pour recevoir les pigeons. Comme le pigeonnier ne descend pas jusqu'au sol, on dispose quelquefois la laiterie, qu'il faut avoir soin de voûter, au rez-de-chaussée. On doit éviter cette disposition, parce que, malgré toutes les précautions que l'on peut prendre, l'odeur pénétrante du colombier peut arriver jusque dans la laiterie.

**313.** *Granges. Volume et composition des récoltes.* Afin que les voitures chargées des récoltes puissent entrer facilement dans les granges, on donne aux portes, qui sont à deux vantaux, $3^{m},30$ à $^{m}4$ mèt. de largeur, sur 4 mètres à $4^{m},50$ de hauteur. Il conviendrait qu'il y eût deux portes, l'une pour l'entrée des voitures chargées, et l'autre, placée sur le côté opposé de la grange, pour la sortie des voitures déchargées.

Les granges ont 8, 10, 12 et même 15 mètres de largeur; mais comme ces dernières dimensions exigeraient des pièces trop fortes pour la charpente, on place des poteaux intermédiaires. Ces poteaux ont l'avantage de soutenir les tas de gerbes quand on dégarnit une partie de la grange sans toucher aux autres; cette disposition permet aussi de faire les granges plus ou moins larges. La hauteur des granges, sous l'entrait, ne doit pas dépasser 7 à 8 mètres.

Pour une récolte annuelle de 30 000 gerbes de 6 kilog. chacune ou 180 000 kilogram. de divers grains, il faudrait deux aires à battre, de chacune 12 mètres de longueur sur $4^{m},50$ de largeur et $4^{m},50$ de hauteur.

*Volume moyen pour les bonnes et mauvaises années, de 100 kilog. de différents produits, au moment des récoltes.*

| | m.cu. |
|---|---|
| 1° De gerbes de froment d'hiver . . . . . | 0,920 |
| 2° *id.* de seigle d'hiver. . . . . | 0,960 |
| 3° *id.* de grosse orge. . . . . | 0,880 |
| 4° *id.* d'avoine. . . . . | 0,900 |
| 5° *id.* de poids et vesces. . . . . | 1,280 |
| 6° De trèfle rouge porte-graine. . . . . | 1,080 |
| 7° *id.* blanc. . . . . | 0,880 |
| 8° De foin de trèfle ou de son regain. . . | 0,960 |
| 9° *id.* de prairie ou de son regain. . | 0,920 |

Quand, dans une grange, on accumule plusieurs des cinq premiers produits, il faut compter, terme moyen, sur 1 mètre cube par 100 kilogrammes de gerbes, à cause des séparations qu'il faut laisser entre ces différents produits. On doit compter sur le même volume pour les foins de trèfle ou de prairie et pour leurs regains.

Pendant les premiers temps d'engrangement, les récoltes diminuent de poids, par suite d'une dessiccation plus complète, et de volume, par suite du tassement.

*Composition moyenne de 100 kilogrammes de gerbes de différents grains.*

| DÉSIGNATION. | SOL | | | |
|---|---|---|---|---|
| | FERTILE. | | MOINS FERTILE. | |
| | Grain. | Paille. | Grain. | Paille. |
| | kil. | kil. | kil. | kil. |
| Froment. . . . . | 30 | 70 | 40 | 60 |
| Seigle.. . . . . | 25 | 75 | 36 | 64 |
| Orge. . . . . | 35 | 65 | 45 | 55 |
| Avoine. . . . . | 30 | 70 | 42 | 58 |
| Pois et vesces. . . . . | 20 | 80 | 24 | 76 |

**314.** *Eau nécessaire dans une ferme* (Maison rustique du XIXe siècle).

| DÉSIGNATION DES INDIVIDUS. | CONSOMMATION | |
|---|---|---|
| | journalière. | annuelle. |
| | litres. | mèt. cub. |
| Une personne adulte, pour tous ses besoins. . . . . | 10 | 3.60 |
| Un cheval de taille moyenne, nourri avec des aliments secs, y compris l'eau nécessaire au pansement et au lavage des écuries et des harnais. . . . . | 50 | 18.00 |
| Une bête à cornes nourrie en vert une partie de l'année, y compris l'eau nécessaire au pansement et au nettoyage des étables. . . . . | 30 | 11.00 |
| Les moutons, qui pâturent une partie de l'année et reçoivent souvent des racines en hiver, tout compris. . . | 2 | 0.73 |
| Les porcs, qui consomment en partie en boisson les eaux du ménage domestique, peuvent être abreuvés et nettoyés (par tête) avec. . . . . | 3 | 1.80 |

A l'aide de ce tableau, on déterminera facilement la quantité d'eau nécessaire aux besoins d'une ferme quelconque (180).

## MATÉRIAUX EMPLOYÉS DANS LES CONSTRUCTIONS.

**315.** *Division géologique des terrains.* Avant de commencer l'étude des matériaux employés dans les constructions, nous croyons convenable de donner la classification des terrains composant l'écorce minérale du globe, afin d'être guidé dans la recherche des gisements de ces matériaux.

*Série des divisions de terrains admises aujourd'hui par les géologues, avec les indications des principales roches qui les composent et le système de soulèvement qui les caractérise.* Les formations sont rangées dans l'ordre descendant, c'est-à-dire en commençant par les plus modernes.

1er GROUPE. — Formation contemporaine.

Terrains d'alluvion qui remplissent les vallées des fleuves.
Volcans modernes éteints et brûlants. Les grands volcans des Andes ont été soulevés pendant cette période.

TERRAIN TERTIAIRE.

2e GROUPE. — Terrain tertiaire supérieur.

| | |
|---|---|
| *Système de la chaîne principale des Alpes* | Couches de sables et alluvions anciennes, tuf à ossements fossiles. Les éruptions de trachytes et de basaltes correspondent en grande partie à cette époque. |

3e GROUPE. — Terrain tertiaire moyen.

| | |
|---|---|
| *Système des Alpes occidentales* | Calcaire d'eau douce avec meulières ; contient souvent des lignites.<br>Grès de Fontainebleau. |

4e GROUPE. — Terrain tertiaire inférieur.

| | |
|---|---|
| *Système des îles de Corse et de Sardaigne* | Marnes avec gypse, ossements de mammifères.<br>Calcaire grossier.<br>Argile plastique avec lignites. |

TERRAIN SECONDAIRE.

5e GROUPE. — Terrain crétacé supérieur.

| | |
|---|---|
| *Système de la chaîne des Pyrénées et de celle des Apennins* | Assise calcaire puissante, appelée la *craie*, avec interposition de couches de silex. |

6e GROUPE. — Terrain crétacé inférieur.

| | |
|---|---|
| *Système du mont Viso* | Grès tuffeau de la Touraine.<br>Grès ordinairement verdâtre, ce qui lui a fait donner le nom de *grès vert*.<br>Sables ferrugineux. |

7e GROUPE. — Terrain jurassique.

| | |
|---|---|
| *Système de la Côte-d'Or* | Couches calcaires, plus ou moins compactes et marneuses, alternant avec des couches d'argile. On les divise en plusieurs étages. Les étages supérieurs portent le nom de *calcaire oolithique*. L'étage inférieur est appelé *lias*.<br>Grès inférieur ou *lias*. |

8e GROUPE. — Terrain de trias.

| | |
|---|---|
| *Système de Thuringerwald* | Marnes de couleurs variées, qu'on appelle *marnes irisées*, renfermant souvent des amas de gypse et de sel gemme.<br>Calcaire très-coquillier, auquel on donne le nom de *muschelkalk*.<br>Grès de couleur variée, qui est appelé *grès bigarré*. |

9e GROUPE. — Terrain du grès des Vosges.

| | |
|---|---|
| *Système du Rhin* | Poudingues et grès. |

10e GROUPE. — Terrain pénéen.

| | |
|---|---|
| *Système des Pays-Bas et du pays de Galles* | Assise de calcaire mêlée de schiste que l'on appelle *zechstein*.<br>Assise de poudingue et de grès appelé *nouveau grès rouge*. |

TERRAIN DE TRANSITION.

11e GROUPE. — Terrain carbonifère.

*Système du nord de l'Angleterre.* — Grès, schistes avec couches de houille et de fer carbonaté. Calcaire carbonifère ou calcaire bleu, avec couches de houille.

12e GROUPE. — Terrain devonien.

*Système des ballons des Vosges et des collines du bocage de la Normandie.* . . . . . — Couches puissantes de grès appelé *vieux grès rouge*, renfermant des couches d'anthracite.

13e GROUPE. — Terrain silurien.

. . . . . — Calcaire, schiste ardoisier, grès à gros grains appelé *grauwacke*.

14e GROUPE. — Terrain cambrien.

*Système du Westmoreland et du Hundsruck, en Écosse.* . . . . . — Calcaire compacte, schiste argileux. Ces roches ont souvent une texture cristalline.

TERRAIN PRIMITIF.

15e GROUPE. — Roches primitives.

. . . . . — Granites et gneiss formant la base principale de la partie intérieure du globe accessible à nos moyens d'observation.

**316.** *Pierres naturelles* (*Art.* nos 11 et suivants). Rondelet, dans son traité sur l'art de bâtir, divise les pierres naturelles en quatre classes.

**317.** *Première classe.* Elle comprend les pierres argileuses, magnésiennes, etc., c'est-à-dire les asbestes ou amiantes, les micas, les vrais talcs, les pierres ollaires, les schistes ou ardoises de différentes espèces, et les roches appelées *de corne ;* elle comprend aussi les basaltes, les pierres de touche, les pierres à rasoirs et une foule d'autres qui ne sont pas en usage dans l'art de bâtir. Les caractères distinctifs de ces pierres sont de ne pas faire effervescence avec les acides, de durcir au feu ordinaire et de ne se réduire ni en chaux ni en plâtre.

**318.** *Deuxième classe.* Elle comprend les pierres calcaires, qui sont celles dont l'usage est le plus fréquent dans les constructions. Elles se réduisent en chaux par l'action du feu ; elles font effervescence avec les acides, dans lesquels elle se dissolvent presque complétement ; elles ne donnent point d'étincelles sous le briquet.

Les pierres à bâtir employées à Paris et dans presque toute la France sont calcaires.

On en distingue cinq espèces propres à être employées comme pierre de taille, ce sont :

1° *Le liais*, qui réunit toutes les qualités d'une bonne pierre de taille ; son grain est fin, sa texture compacte ; il se taille bien et résiste à toutes les intempéries de l'air quand il a été tiré de la carrière par un temps

convenable; il est sujet à se geler quand il est employé avant d'avoir essuyé son eau de carrière.

On distingue trois espèces de liais, le *liais dur*, le *liais Ferault* et le *liais rose*.

Le *liais dur* ou *franc liais* est d'un grain fin, et d'une texture compacte et uniforme; c'est une des plus belles pierres des environs de Paris. Les anciennes carrières de la barrière Saint-Jacques et du Clos des Chartreux étant épuisées, on l'extrait maintenant des plaines de Bagneux et d'Arcueil; les carrières de Clamart en fournissent aussi quelques beaux morceaux. La hauteur de son banc varie de 25 à 30 cent., et on en extrait des blocs qui ont de 3 à 4 mètres de longueur, sur 1m,50 à 2 mètres de largeur. Il est particulièrement employé pour les marches d'escalier, les cimaises, les tablettes et les acrotères de balustrades; on en fait aussi des chambranles de cheminées, des dalles et autres ouvrages analogues qui exigent de la beauté et peu d'épaisseur de banc.

Le *liais Ferault* ou *faux liais* est aussi dur que le précédent, mais d'un grain bien plus gros. Il se trouve quelquefois dans les mêmes carrières que le premier, sous une hauteur d'appareil de 0m,35 à 0m,40. On l'emploie aux mêmes usages, mais surtout pour les ouvrages qui ont plus d'épaisseur.

Le *liais rose* est plus tendre que les deux variétés précédentes. Il se tire des carrières de Maison-Alfort et de Creteil, où la hauteur de banc est de 0m,25 à 0m,30; on en extrait des carrières de l'Ile-Adam dont la puissance varie de 0m,30 à 0m,40. Ce liais s'emploie particulièrement pour faire les carreaux de salles à manger et d'antichambres; on en construit aussi des tablettes et des chambranles de cheminées.

En général, on donne le nom de liais à toutes les pierres dures de bas appareil dont on fait usage à Paris.

2° *Cliquart.* On désigne ainsi une pierre d'un grain fin et égal, et de très-bon appareil, contenant peu de débris coquilliers. Cette pierre est devenue rare, les carrières qui en fournissaient le plus étant presque toutes épuisées; on en extrait cependant encore quelques blocs, de 0m,30 à 0m,35 d'épaisseur, des carrières de Montrouge et de Vaugirard. On tire une pierre qui remplace le cliquart dans les plaines de Bagneux, de Clamart et de Val-sous-Meudon.

3° La *roche*, qui est une pierre très-dure et quelquefois coquilleuse; elle se trouve ordinairement en plusieurs bancs superposés. La meilleure se tire des carrières du fond de Bagneux, de Châtillon et de la Butte-aux-Cailles, près de Bièvre; elle a généralement de 0m,45 à 0m,70 de hauteur de banc, y compris très-souvent 0m,10 à 0m,15 d'épaisseur d'une pierre très-coquilleuse. Les carrières d'Arcueil fournissent une roche qui est très-bonne, quand on a eu soin de bien ébousiner les lits, ce qui oblige de réduire la hauteur du banc de 0m,40 ou 0m,45 à environ 0m,35.

On extrait également des pierres de roche dans les plaines du Bel-Air, de Fleury, de Montrouge, etc.; mais il faut apporter beaucoup de soin dans leur choix : elles contiennent parfois beaucoup de fils que les ouvriers carriers cachent au moyen d'une boue de la couleur jaunâtre des pierres. Les carrières d'Ivry fournissent une roche assez fine très-souvent coupée par des fils et dont la hauteur de banc est d'environ $0^m,40$ à $0^m,45$. A Vitry (Seine), on trouve une roche de $0^m,30$ à $0^m,35$ de hauteur et d'un grain très-fin, qui est recherchée à cause de la grande dimension de ses blocs; on l'emploie pour les balcons et particulièrement pour les monuments funéraires; quoiqu'elle paraisse, en général, très-saine, lorsqu'on l'emploie avant qu'elle ait jeté son eau de carrière, il se produit, après deux ou trois ans d'exposition à l'air, une infinité de petits fils qui finissent par la détériorer entièrement; plusieurs tablettes recouvrant les murs d'escarpe de l'enceinte de Paris, faites de cette pierre tirée dans la mauvaise saison, sont maintenant dans un état complet de dégradation.

On emploie aussi à Paris et dans ses environs différentes autres espèces de pierres de roche dure qui sont très-estimées et parmi lesquelles on distingue celle de Saillancourt, qui fournit des blocs de très-grandes dimensions, et que l'on a employée pour les parapets du pont de Neuilly; celles de Saint-Nom, de l'Ile-Adam, de Silly, etc.; celles de Sainte-Marguerite et de Château-Landon, que l'on emploie depuis plusieurs années à la construction des monuments publics de la capitale; on en a fait les bassins du Château-d'Eau, boulevard Saint-Martin, une partie de l'Arc-de-Triomphe de la barrière de l'Étoile, les parapets du Pont-Royal et la fontaine Saint-Sulpice. Ces pierres sont très-dures et prennent le poli comme le marbre; mais elles ont l'inconvénient d'avoir des moyes et des parties terreuses que l'on est obligé de nettoyer et de remplir avec beaucoup de soin, sans quoi la gelée les ferait éclater; leur hauteur du banc est de $0^m,45$ à $0^m,55$, et comme leur homogénéité permet de les poser en dilit, c'est-à-dire de mettre verticalement les lits de carrière, on peut obtenir la hauteur d'assise que l'on veut.

Les carrières de roche des environs de Paris commençant à s'épuiser, on fait venir cette pierre par eau de différentes localités. Les roches de Bourgogne, et entre autres celle de Châtillon-sur-Seine, avec laquelle on a construit le socle du nouveau ministère des affaires étrangères, sont d'excellentes pierres, tout aussi dures que celles de Château-Landon, et qui n'ont pas, comme cette dernière, l'inconvénient de renfermer des parties terreuses. Leur hauteur de banc varie de $0^m,50$ à $0^m,65$.

4° Le *banc-franc* ou *pierre franche*, qui est de stratification plus récente que la roche; il est moins dur que celle-ci, et d'un grain plus fin et plus égal; on n'y rencontre jamais de parties coquilleuses, ni d'empreintes d'aucune espèce,

On emploie ordinairement cette pierre pour remplacer le liais quand on veut économiser; son épaisseur de banc varie de $0^m,30$ à $0^m,40$, et elle atteint quelquefois $0^m,60$; elle provient des carrières exploitées à Montrouge, Bagneux, Châtillon, Arcueil; on en tire aussi une espèce des carrières de l'Ile-Adam, et une autre de l'abbaye du Val, même pays.

5° *La lambourde.* Cette pierre, plus tendre encore que la précédente, porte de $0^m,65$ à 1 mètre d'épaisseur de banc. Son grain est grossier; celle de Saint-Maur est la plus belle, la meilleure et celle qui a le plus d'épaisseur de banc. La lambourde s'emploie beaucoup à Paris pour la construction des maisons. Elle résiste bien à la gelée quand elle a perdu son eau de carrière, et elle se taille facilement. Les parements des maisons ou édifices construits avec cette pierre durcissent à l'air. A Paris, on emploie aussi le *vergelet* de Saint-Leu, qui est analogue à la lambourde, mais beaucoup meilleur. Le *Conflans* est une très-belle pierre tendre que l'on extrait à Conflans-Sainte-Honorine, sur les bords de l'Oise. Enfin on fait encore usage à Paris d'une pierre tendre appelée *parmin*, que l'on extrait de l'Ile-Adam, et qui est un peu plus tendre mais d'un grain plus fin que le Saint-Leu.

**319.** *Troisième classe.* Elle comprend les pierres gypseuses, pierres que l'on ne peut utiliser, même comme moellons, dans les constructions, à cause de leur peu de consistance et de leur décomposition par l'humidité; aussi est-il défendu de les employer à Paris, surtout pour la construction des bâtiments; on s'en sert quelquefois pour les murs de clôture. Exposées à l'action de la chaleur, ces pierres fournissent le plâtre. Elles ne font pas effervescence avec les acides, et ne donnent aucune étincelle par le choc de l'acier.

**320.** *Quatrième classe.* Elle comprend les pierres scintillantes. Ces pierres, qui donnent des étincelles par le choc du briquet, ne font aucune effervescence avec les acides; elles comprennent les grès, les silex, les pierres meulières, les granits, les porphyres et les basaltes.

Les grès purs, les pierres à briquet et les pierres meulières résistent au feu le plus violent; les granits, les porphyres et les laves se vitrifient à un grand feu.

*Grès.* Ce sont des pierres composées de grains de sable quartzeux, de différentes figures agglutinés ensemble par un ciment calcaire ou argileux. Elles se débitent facilement en gros cubes; il suffit, pour cela, de les étonner en les frappant à petits coups dans une direction déterminée, à l'aide de marteaux dits épinçoirs, ou de pics tranchants.

Dans les pays où il n'y a pas de pierres calcaires, on emploie avec succès le grès comme pierre à bâtir. Dans des localités, à Paris par exemple, on emploie un grès à grain fin et serré pour le pavage des rues.

Les grès se trouvent en masses ou roches informes, que l'on nomme

rognons; quelquefois cependant on les rencontre par bancs ou couches de différentes épaisseurs. On remarque, dans les carrières de grès, que les masses sont moins dures en proportion de la profondeur où elles se trouvent, et que le grès se débite d'autant plus facilement sous des formes déterminées qu'il est plus dur. Cette espèce de pierre n'ayant pas de lit, elle se débite dans tous les sens de la grandeur que l'on veut.

*Pierre à briquet ou silex.* On trouve dans plusieurs pays, dans des bancs de craie, des silex en rognons assez gros pour en former des pavés, et que l'on emploie quelquefois pour construire des massifs en maçonnerie.

On appelle *cailloux*, des fragments de pierres de différentes grosseurs, plus ou moins arrondis, dont la couleur varie du brun foncé au blanc laiteux. On les trouve ordinairement dans les lits des fleuves et dans les terrains d'alluvion, à fleur du sol et quelquefois à des profondeurs considérables. Ils se présentent en grandes masses et forment de grands dépôts depuis l'époque actuelle jusqu'à celle des terrains stratifiés les plus anciens.

*Meulière.* Cette pierre est un composé de concrétions quartzeuses, dont le tissu est criblé de trous. On en distingue de deux espèces, l'une qui se trouve par bancs ou grandes masses, propre à faire des meules de moulins d'une seule pièce, et l'autre en roches ou morceaux isolés, épars dans les campagnes, avec laquelle on forme les meules de plusieurs pièces. Il y en a qui se débite en petits morceaux que l'on emploie comme moellons.

On trouve des carrières de la première espèce à Montmirail (Marne), à la Ferté-sous-Jouarre (Seine-et-Marne), à Menotey et Moissey (Jura), et à Chatellerault (Vienne). On en trouve de la seconde espèce dans les environs de Paris et dans le département de l'Eure.

La meulière que l'on emploie à Paris vient des environs de Corbeil et de Châtillon; les carrières de Villeneuve-Saint-Georges et de Montgeron en fournissent également qui ont les qualités désirables.

Il arrive aussi à Paris des meulières tendres des environs de Versailles et de Buch, ainsi que de Brunoy. On les extrait en blocs de grandes dimensions, et on les taille facilement. Comme elles fournissent des parements d'une belle régularité, on les emploie souvent en remplacement de la pierre de taille; les parements des murs de quais que l'on construit aujourd'hui à Paris sont presque tous faits, sur une épaisseur de $0^m,35$, avec des moellons de cette meulière parfaitement dressés et piqués à vive arête. Les parements en meulière dure de Corbeil et de Châtillon sont préférables à ceux de meulière tendre quand ils sont exécutés avec soin.

La meulière des environs de Corbeil se trouve à $0^m,60$ de profondeur. On l'extrait quelquefois à la surface du sol, au moment où on laboure

les champs ; mais ordinairement on ouvre des carrières, dont on enlève tous les morceaux propres à former des moellons.

Les moellons de meulière donnent la meilleure des maçonneries. Cela est dû à ce que le mortier s'y attache fortement en s'insinuant dans toutes les cavités, et que la meulière résiste sans aucune altération à toutes les influences atmosphériques. Le bel aspect des parements en meulière la fait souvent substituer à la pierre de taille pour cet usage ; les parements des fortifications de Paris sont en meulière sur une épaisseur de $0^m,50$. Les égouts de cette ville se font en meulière, et une ordonnance de police prescrit son emploi pour la construction des fosses d'aisance.

La *caillasse* est une variété de pierre meulière que l'on rencontre en assise à peu près régulière ; mais cette pierre, à l'opposé de la véritable meulière, ayant la surface très-lisse, le mortier y adhère très-difficilement ; c'est pourquoi, dans les devis de maçonnerie en meulière, on stipule que la caillasse sera rejetée.

*Granit.* On désigne en général sous le nom de granit, une espèce de pierre dont la grande dureté varie avec les parties qui la constituent, et qui paraît être composée de trois matières principales, le quartz, le pétrosilex et le mica. Le granit le plus estimé est celui où ces deux premiers corps prédominent ; tel est celui d'Égypte, dit *granit oriental.*

Les temples et monuments égyptiens construits de granit ont résisté, depuis plusieurs milliers d'années, à toutes les intempéries de l'air et aux dévastations des peuples qui ont successivement fait la conquête de l'Égypte.

En France, les granits les plus estimés viennent de Normandie, et proviennent des bancs les plus durs des carrières de Flamanville, près Cherbourg ; de divers lieux des environs de Vire (Calvados), et surtout de Sainte-Honorine-le-Guillaume sur la rivière de l'Orne. La Bourgogne fournit des granits d'une assez bonne qualité.

Le granit se trouve dans presque toutes les contrées de la France, mais surtout en Bretagne, en Auvergne, dans les Vosges et dans les Alpes.

Quoique Paris soit éloigné des carrières de granit, on y emploie cette pierre, tirée de Normandie et de Bourgogne, à la construction des trottoirs, des bordures, des marches d'escaliers très-fréquentés, des bornes, des auges, etc. Ordinairement le granit se taille à la carrière, et il revient à 200 fr. environ le mètre cube rendu à Paris. Dans les localités où le granit est commun, on l'emploie comme pierre à bâtir ; on en fait d'excellents moellons. En France, plusieurs ponts sont en granit, et en Angleterre on fait très-souvent usage de cette pierre pour la construction des grands ponts.

*Les laves d'Auvergne* ont quelque analogie avec les granits, quoique d'un grain plus fin et moins serré. Leur couleur, d'un noir très-foncé,

les fait facilement reconnaître. Les meilleures proviennent des bancs les plus durs de Volvic ; leur grain serré et homogène, qui les rend très-denses, les fait préférer pour le dallage des trottoirs, quand on y fait usage de cette pierre.

*Porphyre.* C'est une pierre siliceuse dont la dureté, plus grande encore que celle du granit, ne permet pas de la tailler et par conséquent de l'employer comme pierre de taille ; aussi ne l'utilise-t-on que comme moellons. Ses parties constituantes sont plus compactes et mieux liées que pour le granit. Les petites taches dont il est marqueté sont de quartz laiteux ou de feldspath ; on y remarque aussi des points noirs et brillants. Les anciens en ont fait des colonnes, des vases, des monuments funéraires, des statues.

Il se trouve du porphyre rouge et du vert ; le premier est taché de jaune dans la variété dite brocatelle d'Égypte. Le porphyre vert était appelé ophite ou serpentin, à cause de sa ressemblance avec la peau de certains serpents.

En France on rencontre le porphyre à Châteaubriand (Loire-Inférieure), dans les montagnes de l'Esterel et du Puget (Var), près de Remiremont (Vosges). M. Colin, dans son usine d'Épinal, travaille aujourd'hui des *porphyres*, dits *mélaphyres*, qui sont tirés de Belfahy et de Ternuay (Haute-Saône). Le dernier, qui a été employé au tombeau de l'empereur, a une très-belle couleur verte ; celui de Belfahy est d'un vert noirâtre dans lequel se trouvent disséminées des marques de cristaux verdâtres de feldspath labrador ; il rappelle le porphyre vert antique de la Grèce. M. Colin travaille aussi la syénite, qu'il extrait de Saint-Maurice ; elle est connue sous le nom de *granite feuille morte ;* on l'a employée pour daller le portique du Panthéon. Enfin, sans parler des pierres calcaires, on travaille encore à l'usine d'Épinal différents granites, tirés principalement de Cornimont, de la vallée de la Bresse, du Tholy et de Clefcy.

*Basalte.* C'est un produit volcanique d'un gris noir et quelquefois verdâtre. Son tissu est serré, son grain est fin ; aussi prend-il un beau poli. Il est brillant dans ses fractures ; sa dureté le rend difficile à travailler, c'est ce qui fait que dans les constructions on ne l'emploie guère qu'à faire des pavés. L'Etna paraît en être composé depuis sa base jusqu'à son sommet, il est très-rare au contraire dans le Vésuve.

Le basalte se trouve souvent par colonnes prismatiques dont la base est un polygone. On en voit sous cette forme à Saint-Tibère, près d'Agde, et au Puy-de-Dôme, près de Clermont, dont les prismes sont réguliers. On en trouve en Italie, du côté de Padoue, qu'on avait pris pour des monuments étrusques.

**321.** *Distinctions usitées entre les pierres de taille.* Relativement à leur emploi, on divise les pierres en deux classes : les pierres dures et

les pierres tendres. Les premières ne peuvent se débiter qu'à la scie à eau et au grès, comme le marbre ; les secondes se divisent à la scie à dents, comme la *lambourde*, le *vergelet*, le *Conflans*, etc.

Les bonnes qualités des pierres, tant dures que tendres, sont d'avoir le grain fin et homogène, la texture uniforme et compacte, de résister à l'humidité, à la gelée, et de ne pas éclater au feu dans le cas d'incendie.

Peu de pierres réunissent toutes ces qualités. Le premier soin, lorsqu'on a un travail de maçonnerie à exécuter, est d'examiner attentivement toutes les pierres dont on fait usage dans le pays. Pour cela on visite les carrières, afin de vérifier si leur exploitation est facile; on examine attentivement les édifices construits avec les pierres en provenant, afin de voir comment elles résistent dans les diverses positions où on les a placées.

Si l'on est forcé d'exploiter de nouvelles carrières, il est bon d'en tirer des pierres dans toutes les saisons de l'année, et de vérifier si elles résistent à l'exposition à l'air, à l'eau, à la gelée et même au feu. On peut, jusqu'à un certain point, vérifier si une pierre résiste à la gelée à l'aide du procédé de M. Brard, qui consiste à imbiber la pierre de sulfate de soude et à l'exposer à l'air; la cristallisation de ce sel produit un effet analogue à celui de la congélation de l'eau et fait reconnaître les pierres que la gelée attaque le plus vivement.

Les pierres scintillantes réunissent mieux toutes les qualités d'une bonne pierre que les pierres calcaires ; mais comme elles sont en général plus dures, elles sont plus difficiles à travailler. Les pierres calcaires sont moins fortes et résistent moins aux intempéries de l'air ; elles sont sujettes à éclater au feu en cas d'incendie.

On remarque que, pour des pierres de même espèce, celles dont la couleur est la moins foncée sont ordinairement les plus tendres.

Les pierres dont la cassure est remplie d'aspérités et de points brillants se travaillent plus difficilement que celles qui ont la cassure lisse et le grain uniforme.

Lorsqu'on mouille une pierre, si elle absorbe l'eau promptement et qu'elle augmente de poids, elle est peu propre à résister à l'humidité.

Les pierres qui rendent un son plein lorsqu'on les frappe ont ordinairement le grain fin et la texture uniforme.

Celles qui exhalent une odeur de soufre lorsqu'on les taille ont beaucoup de consistance.

Enfin, pour des pierres de même espèce, plus elles sont pesantes, plus elles sont dures et fortes.

322. *Briques.* Les briques cuites remontent au temps de Babylone; il est difficile de fixer à quelle époque les Grecs et les Romains ont commencé à en faire usage.

Les dimensions des briques varient suivant les localités, mais le plus

souvent elles ont $0^m,22$ de longueur, $0^m,105$ de largeur et $0^m,05$ d'épaisseur. Dans tous les cas la longueur devrait être égale à deux fois la largeur plus un joint, et, autant que possible, la largeur égale à deux fois l'épaisseur plus un joint. On fait des grandes briques qui ont de $0^m,30$ à $0^m,36$ de longueur sur $0^m,20$ à $0^m,22$ de largeur et $0^m,04$ à $0^m,05$ d'épaisseur. On en fait des petites qui ont de $0^m,16$ à $0^m19$ de longueur sur $0^m,08$ à $0^m,095$ de largeur, et $0^m,04$ à $0^m,05$ d'épaisseur.

Les *briques de Bourgogne* sont les meilleures que l'on emploie à Paris; on y fait encore une plus grande consommation des *briques de Montereau* ou de *Salins*, qui approchent beaucoup des précédentes en apparence et en qualité; les *briques*, dites *de pays*, qui se fabriquent à Paris et dans ses environs, sont bien moins estimées encore; cependant on les emploie avec assez d'avantage dans les bâtiments, à cause de leur légèreté. Les indications suivantes feront reconnaître ces diverses espèces de briques.

Les briques de Bourgogne ont $0^m,220$ de longueur sur $0^m,107$ de largeur, et $0^m,055$ d'épaisseur; cette dernière dimension n'est ordinairement que de $0^m,048$ à $0^m,50$ pour les briques de Montereau. Ces deux espèces de briques sont d'un rouge très-pâle; mais les premières sont plus chargées de petites taches brunes produites par des matières vitrifiées, elles produisent parfois des étincelles sous le choc de l'acier, et elles pèsent 2250 kilog. par mille, au lieu que ce poids n'est que de 2063 kilog. pour celles de Montereau. Les briques de pays sont d'un rouge foncé; en qualité, elles approchent de celles de Montereau, seulement elles résistent mal aux chocs; elles ont encore $0^m,22$ de longueur, mais seulement $0^m,103$ de largeur, et, au plus, $0^m,040$ à $0^m,045$ d'épaisseur; le millier pèse 1935 kilog.

La *brique de Sarcelles*, du village de ce nom, situé à 12 kilomètres de Paris, est celle dont on fait le plus grand usage dans cette ville; elle ne porte que $0^m,21$ de longueur, sur $0^m,095$ de largeur et $0^m,05$ d'épaisseur; sa couleur est le rouge vif uniforme, sans vitrification; elle est beaucoup plus fragile et plus légère que les précédentes; le millier ne pèse que 1750 kilog.

325. *Fabrication de briques.* Lorsqu'on a des briques à faire dans un pays, on commence par soumettre à la cuisson, soit dans un four fait exprès, soit dans un four à chaux, des échantillons de chacune des terres argileuses qui se trouvent à proximité du point de fabrication. On peut rejeter sans cet essai de cuisson les terres qui contiennent des parcelles de calcaire ou de silex; la chaux que donnerait le calcaire à la cuisson, s'éteignant spontanément, détruirait les briques, et les parcelles de silex en éclatant au feu les briseraient.

Le choix de la terre étant fait, pour faciliter la manipulation, il convient d'extraire l'argile au mois de novembre et de la laisser exposée aux intempéries de l'hiver pour ne l'employer qu'au printemps suivant.

On procède alors au corroyage, qui se fait en *marchant* l'argile, la remuant et la battant à plusieurs reprises, en enlevant avec soin toutes les matières pierreuses ou pyriteuses, lesquelles, en servant de fondant, pourraient altérer la brique pendant la cuisson.

L'argile étant bien préparée, on y ajoute la quantité de sable ou d'alumine qui peut être nécessaire, et on remue le mélange de manière à le rendre bien homogène ; puis on y verse la quantité d'eau suffisante pour l'amener à l'état de pâte ductile.

Lorsque la silice est en défaut, le sable que l'on ajoute doit être fin. Le mélange s'opère facilement en étendant la terre par couches d'une épaisseur uniforme et en répandant dessus, en couches aussi uniformes, la quantité de sable jugée nécessaire. Si c'est l'alumine qui manque, il convient, pour faire facilement le mélange, que les deux terres soient réduites en poussière, si cela est possible, ou en pâte molle.

On a reconnu par expérience qu'en général le volume d'eau employé ne doit pas excéder la moitié de celui du mélange que l'on pétrit.

Le corroyage a la plus grande influence sur la solidité des briques, dont il augmente la densité. Deux briques, l'une préparée par les moyens ordinaires et l'autre corroyée avec le plus grand soin, toutes deux ayant été séchées et cuites dans les mêmes circonstances, la première pesait 31 grammes de moins que la seconde, et elles se sont rompues sous les charges respectives de 35 et 65 kilog. En général on a reconnu que les densités de ces briques étaient dans le rapport 82 : 86, et les charges qu'elles supportaient dans celui 70 : 130.

Lorsque le mélange est terminé, on façonne les briques au moyen de moules ; puis on les porte au séchoir, qui est disposé sous un hangar ou en plein air. Dans ce dernier cas, on garantit les briques de l'action directe du soleil, sans quoi la dessiccation étant rapide et inégale à la partie extérieure, les briques se tourmenteraient et l'humidité intérieure ne pourrait sortir qu'en faisant gercer les brisques. La dessiccation des briques étant complète, on procède à la cuisson.

**524.** *Cuisson des briques.* Les briques se cuisent, soit à la volée, soit dans des fours. Le premier mode consiste à disposer les briques en tas sur une aire convenablement dressée. Les tas sont formés de briques placées de champ, par assises. A la partie inférieure du tas, on laisse des vides dont la largeur, sur le sol, est égale à cinq fois l'épaisseur d'une brique; mais que l'on diminue d'assise en assise de manière à pouvoir fermer complétement les vides par la cinquième assise. Outre ces vides, qui règnent sur toute la largeur du tas et qui servent de foyers, il part, de la partie supérieure de chacun d'eux, deux ou trois vides verticaux qui servent de cheminées et facilitent la mise en feu. De plus encore, les rangs des deux premières assises sont formés de briques à peu près en contact par leurs extrémités, mais espacés latéralement tant vide que plein, de manière à recevoir une certaine

quantité de charbon en morceaux de $0^m,03$ à $0^m,04$ de côté. Les briques du pourtour des cinquième et septième assises ont leur face extérieure faisant un certain angle horizontal sur les faces du tas, et on remplit encore les vides qu'elles laissent entre elles et les briques voisines avec des morceaux de charbon ; on peut encore, si on le juge convenable, disposer ainsi le pourtour de quelques autres assises convenablement éloignées, afin que la température soit à peu près la même au pourtour du tas que vers le milieu. On a soin de remplir tous les foyers de bois sec recouvert de morceaux de charbon nommé gaillette avant de poser la cinquième assise. On met le feu après avoir placé la sixième assise. Sur toute la sixième assise, excepté à l'endroit du foyer, on place une couche de houille menue, puis une nouvelle assise de briques, une couche de houille, une autre assise de briques, et ainsi de suite.

Afin de ne pas étouffer le feu, on a soin de ne placer les nouvelles assises, au-dessus de la sixième, qu'au fur et à mesure que le feu pénètre la masse.

Pour empêcher les déperditions de chaleur, et rendre celle-ci autant que possible uniforme en tous les points de la masse, on enduit le périmètre du tas avec de la terre détrempée mélangée de paille hachée. On pourrait encore utiliser la chaleur perdue en couvrant le tas de pierre à chaux.

Un tas peut être formé de vingt-quatre assises de briques et avoir cinq foyers espacés entre eux, à la partie inférieure, de quinze épaisseurs de briques. Par ce mode de cuisson, on ne peut opérer sur moins de 50 000 briques à la fois, et sur plus de 200 000 ; il faut compter sur 1/10 de briques de déchet. Les tas ont quelquefois $6^m,50$ de hauteur.

La quantité de houille brûlée est de 250 kilog. (1/3 de grosse et 2/3 de menue) par millier de briques. Un relevé fait dans le département du Nord, où la houille est à bon marché, a donné, pour le prix de revient (tous frais compris), 12 fr. par millier de briques.

Dans les pays où les briques se cuisent au bois, on construit des fours spécialement affectés à cette cuisson. Ils sont formés de quatre murs verticaux en briques, enterrés ou appuyés par des remblais en terre. Dans le pied d'un des murs sont pratiquées des petites voûtes, plus larges que celles des fours à la volée, reposant sur des pieds-droits de $0^m,60$ de hauteur. Ces voûtes, qui se prolongent sous toute l'étendue du four, sont à claire-voie, afin de laisser passer la chaleur des feux qui se font sous toutes les voûtes.

Pour la cuisson au bois on construit des grands fours qui contiennent 100 000 briques, et des petits qui n'en renferment que 25 000.

On alimente les foyers pendant tout le temps que dure la cuisson si on ne fait usage que de bois. Les briques se disposent dans ce four comme pour la cuisson à la volée.

On profite des murs qui entourent le four pour soutenir un toit fort élevé en tuiles; cette disposition a l'avantage de préserver les briques de la pluie et du vent, choses à redouter dans la cuisson à la volée. Tout compris, le prix de revient est plus élevé par ce procédé que par le premier.

En Suède, en Belgique, et dans quelques départements du nord de la France, au lieu de construire des fours à demeure et en maçonnerie, on se contente de les faire en briques crues, aux abords des ateliers où les briques doivent être employées.

Quand on cuit les briques au moyen de la tourbe, on établit les fours sous de vastes hangars, et on les construit de la même manière que ceux chauffés au bois; les foyers s'étendent sous toute la profondeur de la base du four.

Dans les localités où le charbon manque, on peut faire usage du four à deux compartiments (fig. 15, planche II), construit à l'arsenal de Brest, pour lequel le tableau suivant donne une idée de la conduite du feu pendant la cuisson de la brique.

Ce tableau indique le nombre des fagots brûlés pendant chaque heure de chaque quart. Le premier quart comprend les six premières heures de cuisson; le deuxième quart, les six heures suivantes; le troisième, les six autres, et ainsi de suite.

| HEURES de chaque quart. | Nombre de fagots brûlés dans le compartiment inférieur. | | | | | | | supérieur. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1er quart | 2e quart. | 3e quart. | 4e quart. | 5e quart. | 6e quart. | 7e quart. | 8e quart. |
| 1 | 10 | 23 | 31 | 26 | 31 | 30 | 32 | 16 |
| 2 | 13 | 24 | 28 | 28 | 28 | 32 | » | 18 |
| 3 | 17 | 26 | 27 | 30 | 30 | 28 | » | 17 |
| 4 | 16 | 28 | 29 | 32 | 27 | 30 | » | 20 |
| 5 | 19 | 27 | 31 | 29 | 29 | 29 | » | » |
| 6 | 20 | 29 | 27 | 29 | 27 | 30 | » | » |
| Pour chaque quart. . . | 95 | 157 | 173 | 174 | 172 | 179 | 32 | 71 |

On brûle donc 1053 fagots pesant chacun $8^k,9$, ce qui fait un poids total de $9371^k,70$.

Contenu du four. . { Compartiment inférieur. . . . . 6200 briques.
Compartiment supérieur. . . . . 2800
Total. . . . . 9000

Poids du bois brûlé par millier de briques, 1041 kilog.

Pour charger et décharger le compartiment inférieur, on enlève la maçonnerie A, qui ferme complétement le cendrier du compartiment supérieur pendant toute la durée de la cuisson ; on retire également la plaque de fonte D′ qui sépare l'ouverture du foyer de celle du cendrier.

L'ouverture *a* du cendrier inférieur, comme celle du cendrier supérieur, a $0^m.40$ de côté, et un registre la laisse seulement ouverte au tiers pendant les 7 premiers quarts, et la ferme presque complétement pendant le 8e quart.

BB ouvertures de $0^m,40$ de côté, facilitant le chargement et le déchargement des compartiments, et que l'on tient fermées par des doubles cloisons en briques pendant la cuisson ;

CC voûtes à claire-voie supportant les briques dans chaque compartiment ;

DD grilles dont les sections sont le tiers de celles des chargements à la base. Les barreaux sont en fer de $0^m,03$ de largeur, et ils sont espacés de $0^m,01$ entre eux.

On a trouvé par expérience que l'on obtenait le maximum d'effet du combustible, quand le vide laissé entre les briques à cuire était le tiers du vide total. On place les briques de champ, comme dans la cuisson à la volée, et le chargement se fait complétement avant de mettre en feu. En disposant les briques, on a soin de ménager des vides plus grands vers les parois du four que dans le milieu, afin que la chaleur se propage uniformément dans toute la masse. Dans les parties rétrécies, on a soin aussi de laisser des vides plus grands.

Les portes des foyers sont formées d'un cadre en fer, entre les parois duquel on fait une murette en briques. Au milieu de chaque porte se trouve une petite ouverture qui permet de voir ce qui se passe dans le foyer, sans être obligé d'ouvrir la porte ; cette ouverture se ferme par un tampon amovible en terre.

Fig. 16 et 17, pl. II. Coupes en élévation et en plan d'un four employé à Paris pour cuire des pots à cloisons, des briques pour tuyaux de cheminées et des tuyaux entiers.

CCC petits canaux de communication du four avec la cheminée, ayant $0^m,085$ de largeur sur $0^m,16$ de hauteur ; ils sont éloignés de $0^m,12$ environ. La cheminée a $0^m,25$ à $0^m,30$ de largeur à la base, mais elle devient carrée à une certaine hauteur ;

D porte par laquelle on introduit et on retire la marchandise ; on la ferme pendant la cuisson par une murette en briques ;

E ouverture par laquelle se dégage l'air quand on veut défourner ; cet orifice, qui ouvre dans l'étuve où sèchent les poteries, est fermé pendant la cuisson.

La partie qui couvre le foyer est sphérique, le reste est cylindrique. On brûle du bois, et il paraît que le feu dure de douze à quinze heures par fournée (consulter l'article *Tuiles*).

325. *Couleurs et indices de bonne qualité des briques.* Quand l'argile employée à la fabrication des briques est ferrugineuse, à la cuisson les briques deviennent rose tendre, passent au rouge plus ou moins vif, au rouge pourpre, et enfin au noir, couleur et cassure laitier. Elles

augmentent un peu de volume jusqu'au terme de demi-cuisson, et au delà elles éprouvent un retrait qui va toujours croissant jusqu'à leur vitrification si le feu est assez vif.

Quand l'argile ne contient l'oxyde de fer qu'en faible quantité, mais qu'elle renferme du carbonate de chaux, les briques restent d'un blanc sale pendant toute la cuisson ; elles sont encore susceptibles de se vitrifier, la chaux, comme l'oxyde de fer, étant attaquée par la silice à une haute température.

Si l'argile ne contient ni oxyde de fer ni chaux, elle fournit des briques infusibles, dites *briques réfractaires*, que l'on emploie pour la construction de toutes les parties de fourneaux susceptibles d'être exposées à une température très-élevée.

Les indices de mauvaise qualité des briques sont : avoir une couleur rouge jaunâtre, surtout rendre un son sourd sous le choc, s'émietter entre les doigts, posséder un grain mollasse et grenu, absorber l'eau avec rapidité et se rompre facilement. Une bonne brique, au contraire, rend un son clair par la percussion, elle est dure, son grain est fin et serré dans la cassure ; elle est ordinairement d'un rouge brun foncé, et quelquefois elle présente à la surface des parties vitrifiées. Il ne faut pas cependant toujours se fier à cette dernière apparence, qui provient souvent d'un commencement de vitrification due au degré de cuisson seul, quoique l'argile soit impure et mal préparée.

Il arrive quelquefois que pour donner un plus beau coup d'œil aux briques, le fabricant sème sur la plate-forme du séchoir un peu de sable et de mâchefer. Ces matières s'attachent à la surface des briques encore humides, et un commencement de vitrification, au moment de la cuisson, donne une belle apparence aux briques, qui peuvent cependant être de mauvaise qualité.

**526.** *Briques crues.* L'usage de ces briques, dont Vitruve décrit la fabrication, remonte à la plus haute antiquité ; on en trouve dans la plupart des monuments grecs et romains ; il existe encore en Égypte et en Asie des édifices bâtis avec ces briques à des époques bien antérieures à l'ère vulgaire.

Malgré l'humidité du climat, il y a des localités en France où les briques crues sont d'un usage très-répandu ; dans les faubourgs de Reims, par exemple, on voit des maisons qui en sont parfaitement construites. Ces briques ont $0^m,30$ de longueur, sur $0^m,14$ de largeur et $0^m,07$ ou $0^m,08$ d'épaisseur ; on les fabrique, comme les briques ordinaires, dans des moules réguliers ; les meilleures sont d'argile rouge ou blanche mêlée de sable ; on en fait aussi avec la boue qui se forme sur les routes, laquelle est composée d'argile, de craie et de silex écrasé. Le moment le plus favorable pour leur fabrication est le printemps et l'automne, saisons pendant lesquelles la dessiccation se fait plus lentement et plus également ; elles ne s'emploient qu'après qu'elles sont ar-

rivées, par leur exposition à l'air et au soleil, à une dessiccation complète, sans laquelle la gelée, en faisant gonfler l'eau, amènerait leur destruction. Les anciens ne les employaient que deux ans après leur fabrication; alors ils étaient sûrs qu'elles avaient acquis le degré de solidité dont elles sont susceptibles. Ces briques sont d'un mauvais usage à l'humidité lorsqu'elles ne sont pas recouvertes; dans les pays où on les emploie communément, on a soin de recouvrir les maçonneries de nombreuses couches de peinture à la chaux, ou, si l'on veut faire mieux, on applique dessus un enduit de chaux, d'argile et de boue, lequel est tout à fait imperméable à l'eau, et leur assure une plus grande durée.

527. *Briques creuses. Poteries. Carreaux.* Depuis quelque temps, on fabrique des briques creuses assez légères, en pratiquant dans l'intérieur de parallélipipèdes semblables aux briques ordinaires des petits trous allant d'une extrémité de la brique à l'autre.

A Paris, on fait usage, pour la construction des tuyaux de cheminées dans l'épaisseur des murs, de briques portant l'empreinte d'un et quelquefois de deux tuyaux voisins, en même temps que leurs dimensions correspondent aux épaisseurs des murs. Ces briques ont été imaginées par M. Gourlier, dont elles ont pris le nom.

Dans le bâtiment on désigne sous le nom de *poteries*, les *boisseaux* en terre cuite pour tuyaux de cheminées, les *pots* pour *ventouses* à courant d'air, les *mitres* en terre, etc. Ces divers objets sont en grès ou en terre cuite préparée à peu près de la même manière que celle employée à la fabrication des briques.

Depuis quelques années, pour établir des voûtes et des cloisons très-légères, on fait usage de poteries creuses de formes et dimensions diverses; les unes ont la forme d'un pot à fleurs fermé aux deux extrémités, et dont les dimensions habituelles sont $0^m,10$ de diamètre moyen sur $0^m,15$ de hauteur; les autres sont des cylindres de $0^m,05$ de hauteur seulement sur $0^m,17$ de diamètre. Ces poteries se fabriquent toutes à peu près de la même manière, au moyen d'un tour de potier, avec de la terre préparée comme pour la fabrication des tuiles, des briques et des poteries grossières. Dans le midi de la France, on fabrique encore, pour voûtes légères, des prismes creux en terre cuite qui ont $0^m,14$ de hauteur, des bases hexagonales inscrites dans des cercles de $0^m,17$ de diamètre, et dont le vide est cylindrique.

*Carreaux.* On nomme ainsi des petites dalles employées au pavage des chambres. On en fait en pierre calcaire, souvent à l'état de marbre; on leur donne les formes triangulaire, carrée, hexagonale, octogonale, que l'on emploie séparément ou combinées entre elles (*Int.*, 937).

Les carreaux les plus employés sont hexagonaux et en terre cuite préparée comme pour les briques (523). On en fait de deux grandeurs; les uns, employés au pavage des chambres, ont $0^m,027$ d'épaisseur et

sont inscrits dans un cercle de $0^m,20$ de diamètre; les autres sont inscrits dans un cercle de $0^m,14$ de diamètre; il en faut respectivement 40 et 80 pour couvrir un mètre de surface, et le poids du mille varie de 800 à 900, et de 350 à 400 kilog. Ceux que l'on emploie à Paris sont fabriqués en Bourgogne, à Massy, à Paris et dans ses environs. Les premiers sont les meilleurs, surtout pour les lieux humides; ceux de Massy viennent après, seulement ils sont moins bien moulés que ceux de Paris, que l'on emploie ordinairement.

328. *Carreaux en plâtre.* Avec le mortier de plâtre et des plâtras de peu d'épaisseur, on fait des carreaux qui servent à construire des cloisons d'appartement; ils ont ordinairement $0^m,48$ de longueur, sur $0^m,32$ de largeur, et de $0^m,055$ jusqu'à $0^m,16$ d'épaisseur; l'épaisseur la plus habituelle est de $0^m,08$, c'est celle qui est la plus conforme à l'équarrissage ordinaire des huisseries et des poteaux de remplissage des cloisons.

Depuis quelques années, on fait à Paris des carreaux creux en plâtre, ayant à peu près les mêmes dimensions que les précédents; ils ont l'avantage d'être très-légers, et surtout d'assourdir les appartements divisés par les cloisons qui en sont construites.

329. *Terre employée comme mortier.* On emploie quelquefois l'argile pour relier les moellons et surtout les briques. On en fait un usage exclusif pour la construction des foyers et en général de toutes les constructions susceptibles d'être exposées à une température élevée; dans ce cas, on y mélange une plus forte quantité de sable, afin que la haute température ne produise pas un retrait trop considérable.

330. *Plâtre, sa cuisson, son emploi.* (*Art.* n^os^ 61 et suivants.) Le sulfate de chaux, que l'on désigne sous le nom de *gypse*, fournit le plâtre quand on lui fait perdre son eau de cristallisation en l'exposant à une certaine température.

On a reconnu que les grandes couches de pierre à plâtre surmontent souvent des bancs de pierre calcaire sans en être jamais surmontées; d'où on est porté à conclure qu'elles sont d'une formation plus récente.

Le sulfate de chaux pur ne donne pas d'étincelle sous le choc de l'acier et ne fait pas effervescence avec les acides.

Les fours le plus employés à la cuisson des pierres à plâtre se composent d'un mur de $4^m,50$ formant le derrière du four, et de deux autres construits perpendiculairement au premier, et destinés à supporter un comble à deux égouts, dont les tuiles sont posées à claire-voie, afin de laisser passer la fumée et la vapeur.

Sous cette espèce de hangar, dont le devant reste entièrement ouvert, on établit, parallèlement aux murs de côté, plusieurs petites galeries voûtées de $0^m,65$ environ de hauteur sur $0^m,50$ de largeur, séparées par des piliers de même largeur. Ces galeries se font avec les plus gros

morceaux de pierre à plâtre, en ayant soin de laisser des petits vides dans les voûtes pour faciliter le passage de la fumée. On place alors de la pierre à plâtre sur les voûtes, jusqu'à la hauteur $4^{m},50$ des murs du four, en terminant par une couche d'éclats provenant des résidus de l'extraction.

On remplit alors les galeries de fagots, de bourrées ou de bois fendu; on y met le feu, que l'on active graduellement au commencement; puis on entretient une chaleur régulière jusqu'à la fin de l'opération. La cuisson étant complète, on recouvre la masse d'une couche de poussier de pierre à plâtre et on laisse refroidir.

La quantité de bois brûlée dans ces fours varie évidemment suivant l'essence et l'état de dessiccation du bois.

*TABLEAU des résultats moyens obtenus pour trois fours différents contenant chacun 60 mètres cubes de plâtre.*

| BOIS. | FAGOTS OU BOURRÉES. | | COMBUSTIBLE BRULÉ | |
|---|---|---|---|---|
| | Nombre. | Poids de chaque. | en totalité. | par mètre cube. |
| Chêne. . . . . | 550 | $23^{k}.00$ | 12650 k. | $210^{k}.83$ |
| Bouleau et châtaignier mélangés. . | 700 | 16 .50 | 11550 | 192 .50 |
| Chêne et charme mélangés. . . . | 900 | 9 .00 | 8100 | 135 .00 |

La durée de la cuisson du plâtre varie de 10 à 15 heures; elle dépend de la quantité de pierre mise au four, de l'état de dessiccation du bois et de l'état de l'atmosphère. L'habitude indique assez le point auquel il faut arrêter le feu, et ce moment est très-important à saisir, car la bonne qualité du plâtre dépend en grande partie de sa cuisson à un degré précis, en deçà et au delà duquel on n'obtient qu'un plâtre très-inférieur.

La cuisson du sulfate de chaux s'opère aussi dans des fours analogues à ceux employés pour cuire la brique au moyen du bois (524), mais à un seul compartiment. La figure 18, planche II, représente un de ces fours.

*TABLEAU du nombre des fagots brûlés pour la cuisson d'une fournée de 8 mètres cubes de plâtre, pendant chaque heure de cuisson.*

| Heures. . . . | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Fagots. . . . | 13 | 20 | 28 | 27 | 26 | 27 | 28 | 26 | 28 | 30 |

Total : 253 fagots, dont le poids est $8^{k},7 \times 253 = 2201$ kilog.; ce qui fait 275 kilog. par mètre cube de plâtre.

Pour cuire le plâtre, on modère le feu en commençant, et on l'augmente graduellement jusqu'à ce que le sulfate ait perdu toute son eau de cristallisation. Son poids a alors diminué de 1/4 environ.

Quand le plâtre est convenablement cuit, l'ouvrier qui l'emploie sent, en le maniant, qu'il est doux et qu'il s'attache aux doigts; c'est à ces indices que l'on peut surtout reconnaître le bon plâtre; les enduits qu'il forme sont d'un grain fin et agréable à l'œil. Lorsqu'il n'est pas assez cuit, il est aride, n'absorbe l'eau qu'imparfaitement et ne forme pas un corps assez solide. Quand il est trop cuit, il refuse l'eau parce qu'il est en partie vitrifié; il est devenu maigre, graveleux; il s'égrène au lieu de former un corps solide quand il est employé.

Les plâtres de mauvaise qualité sont en général d'une couleur jaunâtre; ils sont rudes au toucher comme la pierre calcaire pulvérisée; ils sont longs à prendre; ils donnent des enduits qui ne résonnent pas sous la truelle bretée; ils se rayent profondément et se gercent facilement.

Le plâtre exposé à l'air absorbe l'humidité et perd ses qualités, aussi doit-on l'utiliser le plus tôt possible après sa cuisson. Si on le tire de loin, il convient, pour les mêmes raisons, de faire venir la pierre, que l'on cuit au moment d'employer le plâtre. Lorsque l'on veut conserver le plâtre, il faut apporter le plus grand soin à le préserver du contact de l'air.

Il existe des plâtres dont la prise serait tellement prompte, immédiatement après la cuisson, que l'ouvrier n'aurait pas le temps de l'employer; c'est ce qui fait que quelquefois des compagnons intelligents, pour tirer le meilleur parti possible de leur plâtre, le laissent reposer 4 ou 5 jours avant de l'employer.

Le plâtre réduit en poudre, soit en le battant, soit au moyen de meules ou de cylindres, n'a pas besoin du concours d'autres matières pour former un corps d'une dureté moyenne; il suffit d'y mélanger une certaine quantité d'eau, qui produit une cristallisation confuse et fait reprendre au plâtre à peu près sa solidité primitive.

Le plâtre jouit de la propriété d'adhérer au bois et à la pierre; mais il faut éviter de l'employer dans les lieux humides; au sec il se conserve parfaitement bien.

Pour gâcher le plâtre, il faut à peu près autant d'eau que de plâtre. Cependant on varie cette quantité d'eau suivant l'usage auquel on destine le plâtre; ainsi, on la prend plus petite, c'est-à-dire qu'on *gâche serré*, quand on a besoin que le plâtre conserve toute sa force; mais alors il faut l'employer sitôt qu'il a été gâché; on met plus d'eau, c'est-à-dire qu'on *gâche clair*, quand l'emploi du plâtre exige plus de temps; enfin on gâche avec plus d'eau encore, c'est-à-dire qu'on forme ce qu'on appelle un *coulis*, quand le plâtre doit être employé pour boucher des trous où la truelle ne peut atteindre.

A Paris, pour l'emploi ordinaire du plâtre, la quantité d'eau à mettre dans l'auge, pour un voyage de garçon, est d'environ deux seaux; pour *deux truellées*, un seau et demi; *une truellée*, un seau; *une demi-truellée*, un demi-seau, et *une poignée*, un quart de seau. Quand le maçon crie de lui gâcher *gros comme un œuf*, il demande à peu près la moitié d'une poignée.

Une précaution à prendre quand on gâche le plâtre, c'est de mettre d'abord la quantité d'eau nécessaire dans l'auge, et d'y semer ensuite uniformément le plâtre à l'aide de la truelle. Le garçon apporte le tout au maçon, qui le remue avec une truelle en cuivre qu'il agite dans tous les sens, en cassant les mottes avec la main gauche. Si le plâtre gâché est un peu clair pour être employé, le maçon le laisse un peu *couder*, c'est-à dire prendre une légère consistance; alors il l'emploie avec rapidité, car une fois que le plâtre a commencé à couder, il n'est pas longtemps à prendre.

Un mètre cube de plâtre en poudre produit environ $1^{m}.18$ de mortier, et le gonflement, après 24 heures d'emploi, est environ 1 pour 100, dont la moitié était produite après la première heure de mise en œuvre.

Sous le rapport de l'emploi du plâtre dans les constructions, on en distingue de trois sortes :

1° Le *plâtre au panier*. C'est celui qui est à l'état dans lequel le fabricant le livre à l'entrepreneur; on l'emploie pour faire les aires de plancher, hourder les murs et pans de bois, et faire les crépis. On appelle encore ainsi le plâtre tamisé dans un panier d'osier; il est plus fin que le précédent, et il sert ordinairement à faire les crépis d'une faible *charge* (épaisseur);

2° Le *plâtre au sas*. C'est celui qui est passé dans un tamis de crin; il sert ordinairement à faire les enduits et les moulures;

3° Le *plâtre au tamis de soie*. Il est utilisé pour faire les beaux enduits et moulures qui doivent recevoir de la peinture.

On distingue encore les *mouchettes* et la *fleur de plâtre*. Les mouchettes sont les résidus provenant du passage du plâtre au sas. On les utilise ordinairement en les mêlant avec de l'autre plâtre pour faire de gros ouvrages.

La fleur de plâtre est le plâtre qui se trouve en poussière plus fine encore que celui passé au tamis de soie. On l'obtient en faisant sauter du plâtre sur une pelle, à laquelle la fleur s'attache assez facilement; c'est de ce mode de préparation que lui vient le nom de *plâtre à la pelle*, que lui donnent les maçons.

Les plâtres employés à Paris sont tirés des carrières de Montmartre, Pantin, Ménilmontant, Belleville, Charonne et Montreuil. Celui de Pantin est le plus estimé.

**331.** *Chaux*. Le carbonate de chaux, à une température suffisante, perd son acide carbonique et fournit la chaux.

Les pierres calcaires ou *pierres à chaux* font effervescence avec l'acide azotique et se laissent pour la plupart profondément rayer par une pointe de fer.

Les propriétés générales des chaux, lorsqu'elles ont été réduites en pâte, sont de perdre leur eau par l'évaporation, d'absorber l'acide car-

bonique de l'atmosphère et de former un silicate de chaux en se combinant avec la silice du sable auquel on les a mélangées. De ces effets combinés, il résulte la formation d'un corps qui durcit en adhérant aux matériaux de construction et fournit des masses solides.

Les chaux que l'on emploie à Paris et dans ses environs proviennent de Champigny, Sèvres, Meudon, Marly, Essonnes, Melun, Senlis et Rambouillet; ces deux dernières sont très-estimées. Autour de Paris il existe aussi des fabriques considérables de chaux, dans lesquelles on fait des chaux hydrauliques naturelles et artificielles; les produits de celles de la Gare, de Vaugirard, des Moulineaux et des buttes Chaumont ne laissent rien à désirer quand ils ont été préparés avec les soins convenables. On emploie aussi, pour les grands travaux de construction, les chaux hydrauliques de Tournay, de Cassel, de Metz, etc.

Si l'on considère la chaux sous le rapport de la quantité d'eau nécessaire pour la réduire en pâte, on distingue :

1° La *chaux grasse*, qui est celle dont le volume augmente d'au moins 1/4 et souvent de deux fois 1/2 son volume primitif par l'extinction. Cette chaux est la plus profitable aux entrepreneurs, attendu qu'elle se combine avec une très-grande quantité de sable. On l'emploie pour la confection des mortiers de maçonneries ordinaires; mais il faut s'en abstenir pour tous les travaux hydrauliques ou souterrains, attendu qu'elle n'y durcit que très-imparfaitement;

2° La *chaux maigre*, qui est celle dont le volume reste à peu près constant à l'extinction. Il y a de la chaux maigre qui est hydraulique, et de l'autre qui ne l'est pas. Elle fournit moins de mortier que la précédente. Elle durcit assez vite à l'air. A défaut d'autres, on l'emploie aux mêmes usages que la précédente quand elle ne jouit pas de la propriété hydraulique.

Si l'on considère la chaux sous le rapport de la dureté que sa pâte peut acquérir lorsqu'elle est immergée sous l'eau, on distingue :

1° La *chaux non hydraulique*, qui est celle qui ne durcit pas dans l'eau; elle comprend les deux variétés précédentes;

2° La *chaux hydraulique*, qui est celle qui durcit dans l'eau; cette chaux est plus ou moins maigre, c'est-à-dire qu'elle foisonne peu à l'extinction;

3° Il y a encore la chaux dite *chaux-ciment* ou *ciment romain*; c'est celle qui n'est pas susceptible de fuser (540).

L'analyse a fait reconnaître, comme le confirme le tableau suivant :

1° Que le carbonate qui fournissait la chaux grasse contenait moins de 1/10 de matières étrangères;

2° Qu'au-dessus de 1/10, le carbonate fournissait une chaux qui était d'autant plus maigre que cette proportion de matières étrangères était plus grande;

3° Que la propriété hydraulique était due à la formation, au feu, d'un silicate de chaux; c'est-à-dire que la silice jouait un rôle essentiel dans cette combinaison, mais que la combinaison n'avait lieu qu'autant que la silice se trouvait en gelée ou réduite à un état de ténuité extrême dans son mélange avec le carbonate de chaux.

*TABLEAU de la composition de quelques pierres à chaux,*
d'après les analyses de M. Berthier.

| | |
|---|---|
| Chaux grasse de Château-Landon. . . . . | 96,40 Chaux pure.<br>1,80 Magnésie.<br>1,80 Argile (silice et alumine). |
| Chaux maigre non hydraulique de Coulommiers. . . . . | 78,00 Chaux pure.<br>20,00 Magnésie.<br>2,00 Argile (silice et alumine). |
| Chaux moyennement hydraulique de Saint-Germain. . . . . | 89,00 Chaux pure.<br>1,00 Magnésie.<br>10,00 Argile (silice et alumine). |
| Chaux très-hydraulique de Senonches. . | 70,00 Chaux pure.<br>1,00 Magnésie.<br>29,00 Silice. |

A ce tableau, on peut ajouter :

| | |
|---|---|
| Chaux maigre non hydraulique de Brest. | 82,30 Chaux pure.<br>10,00 Oxyde de fer.<br>7,70 Argile. |

Ces analyses font voir que la magnésie et l'oxyde de fer rendent la chaux maigre non hydraulique, et que la silice pure ou mélangée d'alumine la rend hydraulique.

M. Berthier, en opérant par synthèse, a obtenu, pour la même composition, des chaux jouissant des mêmes propriétés que celles du tableau, et il a reconnu de plus :

1° Que la silice en gelée, calcinée avec de la chaux pure, donnait un produit hydraulique;

2° Que l'alumine, la magnésie, l'oxyde de fer et l'oxyde de manganèse, calcinés un à un avec de la chaux pure, donnaient une chaux maigre;

3° Que l'alumine et la magnésie, mêlées avec la silice, exaltaient la propriété hydraulique; mais que les proportions les plus convenables pour ce mélange étaient une partie de silice pour une partie d'alumine ou une partie de magnésie.

Avant ces analyses, M. Vicat avait trouvé que si l'on faisait cuire dans un four à chaux un mélange d'argile et de chaux éteinte ou de carbonate de chaux réduit en pâte, on obtenait de la chaux hydraulique, quand la proportion d'argile était d'au moins 10 pour 90 de chaux, et que la chaux était d'autant plus hydraulique que la proportion d'argile était plus considérable; mais que si cette proportion d'argile dépassait 34 pour 66 de chaux, le composé ne fusait plus.

Depuis que cette théorie a été clairement établie, on a fait, par la synthèse, des essais sur tous les composés qu'il était possible d'obtenir en faisant varier les proportions de chaux et d'argile. Ces essais ont conduit à ranger les chaux sous les dénominations suivantes :

| | Argile. | Chaux. |
|---|---|---|
| *Chaux hydrauliques*, celles qui contiennent. . . . . | 0,10 | 0,90 |
| | 0,20 | 0,80 |
| | 0.30 | 0,70 |
| Limite. . . . . | 0,34 | 0,66 |
| *Chaux-ciments*, celles qui contiennent. . . . . | 0,40 | 0,60 |
| | 0,50 | 0,50 |
| | 0,60 | 0,40 |
| Limite. . . . . | 0,61 | 0,39 |
| *Ciments hydrauliques* ou *pouzzolanes*, celles qui contiennent. . . . | 0,70 | 0,30 |
| | 0,80 | 0,20 |
| | 0,90 | 0,10 |

*Ciments ordinaires*, celles qui contiennent plus de 0,90 d'argile.

Les différentes espèces de chaux que nous venons d'énumérer se distinguent par les propriétés suivantes :

1° La *chaux grasse*, mise en contact avec l'eau, produit le même bruit qu'un fer rouge que l'on tremperait dans cette eau; elle dégage de la chaleur, au point de mettre l'eau en ébullition et de dégager des vapeurs légèrement caustiques; elle augmente beaucoup de volume, foisonne et se réduit en une pâte blanche, laquelle, immergée dans une masse d'eau suffisante, s'y dissout complétement. La chaux pure se dissout dans cinq à six cents fois son poids d'eau;

2° La *chaux maigre* non hydraulique fuse à l'extinction, mais plus lentement et avec un moindre dégagement de chaleur que la chaux grasse; elle augmente moins de volume et sa pâte ne durcit pas non plus sous l'eau;

3° La *chaux hydraulique* se comporte à peu près comme la précédente à l'extinction; mais sa pâte, mise sous l'eau, fait corps dans un temps plus ou moins long;

4° La *chaux-ciment* ne fuse pas, mais, réduite en poudre, puis en pâte, elle prend corps très-rapidement;

5° Le *ciment hydraulique* ou *pouzzolane* est trop maigre pour fuser et former pâte; mais, réduit en poudre et mélangé avec de la chaux grasse, il donne une matière qui jouit de la propriété de durcir promptement sous l'eau;

6° Le *ciment ordinaire* est inerte quand l'argile qui entre dans sa composition ne contient pas de chaux, et il acquiert des qualités légèrement hydrauliques à mesure que la proportion de chaux augmente.

Les chaux maigres non hydrauliques, c'est-à-dire les chaux ou carbonates de chaux dans lesquels il entre une quantité notable d'oxyde de fer ou de manganèse, ne sont pas propres à cette transformation en chaux hydrauliques par le concours seul de l'argile et du feu; on est obligé, pour leur donner cette qualité, d'employer, non pas de l'argile, mais de la pouzzolane ou ciment hydraulique obtenu par la calcination de l'argile calcaire.

*Manière dont se comportent les différentes sortes de chaux, lorsque, réduites en pâte, elles sont immergées sous l'eau, seules, ou mélangées de sable.*

1° La *chaux grasse*, dans un volume d'eau indéfini, se combine rapidement avec un poids d'eau à peu près égal aux 0,22 du sien; retirée et exposée à l'air, elle fuse avec dégagement de chaleur, en se réduisant en poudre impalpable. La matière

obtenue, appelée *hydrate de chaux*, peut encore absorber une grande quantité d'eau, mais sans qu'il y ait ni combinaison ni dégagement de chaleur. Cet excès d'eau, qui donne naissance à une pâte plus ou moins ferme, peut se dégager en assez grande quantité par le rebattage, pour qu'il soit inutile d'en ajouter de nouvelle pour la fabrication du mortier.

Les mortiers de cette chaux restent mous, comme le fait la chaux seule, quand on les prive du contact de l'air, ou plutôt de l'acide carbonique; la solidification de la chaux étant due à l'absorption de cet acide, on en conclut que la chaux est sans effet sur le sable quartzeux.

La chaux continue d'absorber l'acide carbonique jusqu'à ce que l'acide soit à la base dans le rapport approché de 43 à 57, comme dans les sous-carbonates de chaux naturels, et de plus, comme l'eau de l'hydrate n'a pas été rejetée par cette solidification, on voit que l'on obtient un hydrocarbonate de chaux.

D'après M. Vicat, 100 parties de chaux grasse absorbent, en se solidifiant, 74 parties d'acide carbonique, et en retiennent 17 d'eau.

2° La *chaux hydraulique*, éteinte à la manière ordinaire, solidifie, comme la chaux grasse, une certaine quantité d'eau, et forme, avec une addition d'eau, une pâte plus ou moins ferme, laquelle, exposée à l'air, se solidifie en absorbant une moindre quantité d'acide carbonique que la chaux grasse, et en retenant également une certaine portion d'eau. D'après M. Vicat, 100 parties d'une chaux hydraulique contenant 1/5 de son poids d'argile absorbent, en se solidifiant, 54 parties d'acide carbonique et retiennent 15 parties d'eau; ainsi, ce produit, composé de 100 parties de chaux, 25 d'argile, 67,5 d'acide carbonique et 18,7 d'eau, est encore un hydrocarbonate de chaux, dans lequel l'argile paraît être en dehors de la combinaison.

Quoique 65 parties de silice combinées avec la chaux, par la calcination, ne rendent réellement insoluble dans l'eau que 35 parties de chaux; cependant, pour qu'une chaux soit hydraulique, c'est-à-dire pour qu'étant réduite en pâte, elle se solidifie sous l'eau, et par conséquent sans le concours de l'acide carbonique, il suffit qu'elle soit combinée, par la calcination, à 6 ou 7 centièmes de silice, une attraction moléculaire du silicate de chaux formé sur la chaux libre peut seule expliquer comment cette dernière devient insoluble.

La combinaison de la silice avec la chaux est la seule inattaquable par l'eau; l'alumine et quelques autres oxydes ne font qu'exalter les propriétés hydrauliques, sans pouvoir, seuls, communiquer ces propriétés à la chaux.

Les chaux hydrauliques contenant la limite d'argile, c'est-à-dire 34 d'argile pour 66 de chaux, donnent des mortiers qui durcissent rapidement; mais il faut que toutes les molécules de chaux soient attaquées par l'eau au moment de l'extinction; car s'il en reste de libres, elles fusent seulement dans la masse, et en désagrégent toutes les parties, qui ne peuvent plus ensuite prendre aucune consistance. Il conviendrait, pour éviter cet inconvénient, qui s'est déjà présenté, de pulvériser ces chaux limites, comme on le fait pour les chaux-ciments; par là, toutes les molécules de chaux seraient mises à peu près dans les mêmes circonstances pour leur extinction, et l'inconvénient signalé ne serait pas à redouter.

La chaux récemment cuite étant éteinte par le procédé ordinaire (535), en pâte ni trop ferme ni trop molle, puis logée au fond d'un vase quelconque sous une eau potable, passe graduellement de l'état pâteux à ce premier degré de cohérence qu'on appelle *prise*, et, d'après M. Vicat, on dit qu'une chaux est *éminemment hydraulique* quand la pâte, ainsi immergée, fait prise du 2e au 6e jour, suivant la saison (la température de l'eau ayant une influence très-marquée); et quand, après un mois, elle est déjà dure et superficiellement insoluble, et qu'après 6 mois, elle donne des éclats par le choc. Une chaux est dite *moyennement hydraulique* quand sa prise n'a lieu que du 6e au 9e jour, et lorsque après 4 à 5 mois sa consistance est comparable à celle que prend à l'air une pâte argileuse pétrie à bonne consistance, et que sa surface n'abandonne plus de chaux au bain

d'immersion. Enfin, les chaux *faiblement hydrauliques* ne font prise que du 9e au 15e jour; leur consistance après 6 mois ne dépasse pas celle du savon sec, et l'eau d'immersion peut se couvrir encore d'une pellicule de chaux carbonatée.

La cohésion qui constitue la prise se mesure au moyen d'une aiguille à tricot d'un peu plus d'un millimètre de diamètre, limée carrément à l'une de ses extrémités, et chargée à l'autre d'un culot de plomb du poids de 0k,30; il y a prise quand la pâte, de molle qu'elle était, parvient à supporter sans dépression sensible cette aiguille placée verticalement. Les chaux hydrauliques indiquées au tableau du n° 536 ont toutes satisfait à cette condition, après des durées d'immersion de 7 à 14 jours.

3° *Chaux-ciments.* Par la carbonisation des carbonates de chaux, dans lesquels les proportions d'argile varient de 34 à 61 pour 66 à 39 de chaux, il se forme un silicate de chaux plus ou moins abondant, et la chaux qui a pu rester libre ne peut plus fuser, de sorte que l'eau est sans action sur toute la masse de cette chaux quand elle sort du four; mais, réduite en poudre et mouillée d'une quantité d'eau suffisante pour en faire une pâte plus ou moins consistante, il se produit une cristallisation confuse, et la pâte prend corps sous l'eau et d'autant plus rapidement que le silicate est plus abondant, si toutefois il n'est pas en quantité suffisante pour nuire à l'action réciproque des molécules les unes sur les autres.

La prise est d'autant plus rapide que la chaux n'a pas été exposée à l'air depuis sa sortie du four, et, à ce moment, si on la broie et si on l'utilise immédiatement, la prise est quelquefois si rapide qu'on n'a pas le temps de l'employer (540).

4° Les *ciments hydrauliques* ou *pouzzolanes* étant composés de 61 à 90 d'argile pour 39 à 10 de chaux, ils renferment, après la cuisson, du silicate de chaux, sans qu'il y ait assez de chaux libre pour que le résidu de la calcination, réduit en poudre, fasse pâte, et l'eau ne produit aucun effet sur cette poudre, que l'on ne peut utiliser qu'en y mélangeant une certaine proportion de chaux grasse. Le silicate se trouve, suivant les proportions de chaux qu'il contient, dans les mêmes conditions que dans une chaux plus au moins hydraulique, ou que dans la chaux-ciment.

5° *Ciments de briques* ou *de tuiles.* Ces matériaux contenant généralement moins de 1/10 de chaux, ils sont encore en dehors des pouzzolanes; mais cependant celle qu'ils peuvent contenir est combinée avec la silice, et on remarque, quand l'argile n'a pas été trop cuite, que de la chaux grasse, combinée avec ces matières pulvérisées, donne un mortier qui a un léger degré d'hydraulicité.

Comme la pulvérisation de la brique ou de la tuile est coûteuse, il vaut mieux, au lieu de faire usage de ces matières, fabriquer des pouzzolanes énergiques, dont une légère quantité, mélangée au mortier ordinaire de chaux grasse, suffit pour faire un très-bon mortier hydraulique. Ce n'est qu'à défaut de toute autre matière qu'on doit avoir recours à l'emploi du ciment de briques ou de tuiles.

D'après M. Vicat, de l'argile, après une première cuite, donnant à la combinaison avec la chaux une énergie représentée par 1, bis-cuite, cette énergie est représentée par 0,30, et demi-vitrifiée par 0,19; on voit donc que c'est une erreur de croire que la brique la plus cuite est la plus convenable pour la fabrication des mortiers.

**532.** *Recherches et moyens de se procurer de la chaux hydraulique.* La chaux hydraulique est fournie par la simple cuisson du calcaire naturel qui contient tous les éléments de cette chaux (531); mais, dans les localités où ce calcaire ne se trouve pas, on fabrique la chaux hydraulique en faisant un mélange intime de tous les éléments qui doivent entrer dans sa composition. On conçoit que l'on ne doit avoir

recours à ce second mode de fabrication qu'à défaut de carbonate hydraulique naturel.

Lorsqu'on aura besoin de se procurer de la chaux hydraulique dans une localité, on se guidera dans ses recherches en se rappelant que c'est le mélange de l'argile au carbonate calcaire qui fournit toutes les variétés de chaux hydrauliques, et que par conséquent les carrières où alternent les bancs d'argile et de pierre calcaire sont celles où il y aura le plus de chances de succès, quand toutefois ces bancs feront partie d'une même formation. Il ne faut pas négliger ces recherches parce que dans la localité on n'a encore fabriqué que de la mauvaise chaux; cela peut provenir de l'absence ou de la mauvaise direction de recherches antérieures; ainsi, à Paris, on a fait venir pendant longtemps de la chaux hydraulique de Senonches, qui coûte 80 fr. le mètre cube, tandis que les buttes Montmartre, Chaumont et Romainville contiennent des calcaires fournissant en abondance toutes les variétés de chaux hydrauliques.

Comme on ne rencontre aucun calcaire argileux dans les divisions supérieures du *terrain crétacé supérieur* (515), il est inutile d'y faire des recherches; mais les divisions inférieures sont plus favorables, on y rencontre une craie marneuse qui repose sur l'argile du gault auquel elle est souvent liée par une transition insensible. On y trouve une proportion d'argile d'autant plus grande que l'on s'approche davantage du gault; ainsi, de 7 à 8 pour 100 que contiennent les bancs supérieurs, on arrive quelquefois à 40 ou 45 pour 100. Les chaux hydrauliques provenant de cette formation ont quelquefois l'inconvénient d'éprouver un retrait sensible quand, après avoir été placées sous l'eau, elles se trouvent exposées à l'air; pour éviter cet effet, dangereux dans les constructions, on fait le mortier très-ferme et avec un bon sable siliceux.

Les calcaires que l'on rencontre dans le *terrain crétacé supérieur* donnent de bonnes chaux hydrauliques, mais ils ne s'y trouvent en général qu'en couches très-minces ou en rognons.

Dans certaines localités, le *terrain suprajurassique* fournit des calcaires contenant de l'argile et du carbonate de magnésie. Lorsque l'argile est en proportion convenable (de 8 à 10 pour 100), ce calcaire donne une bonne chaux hydraulique. La présence de l'argile se reconnaît par une couleur jaune foncé ou brun, une forte odeur terreuse et un toucher onctueux.

*L'étage jurassique supérieur*, qui comprend toutes les formations à grandes alternances de calcaires et de marnes, se divise en plusieurs groupes intéressants à étudier sous le rapport de leurs produits en chaux hydrauliques.

Les *calcaires portlandiens* supérieurs contiennent des dolomies vertes qui donnent de la chaux hydraulique; mais ceux inférieurs n'en renferment pas.

Les *calcaires kimméridiens* supérieurs et les marnes calcaires de ce groupe jouissent de propriétés hydrauliques variables, mais faibles en général. Dans l'étage moyen et dans l'étage inférieur, ces qualités sont plus prononcées, et les chaux hydrauliques qu'on en tire seraient excellentes si, par l'effet des fossiles qui y abondent quelquefois, elles n'avaient pas l'inconvénient de se diviser en strates.

L'*oxford-clay* est abondant en calcaire argileux fournissant de la bonne chaux hydraulique.

La *grande oolite* ou *oolite inférieure* contient des calcaires argileux et magnésiens.

Le *lias*, surtout, renferme des assises marno-calcaires à chaux hydrauliques et à ciments.

Dans le terrain *keuprique*, les *marnes irisées* fournissent des calcaires magnésiens.

Le *muschelkalk*, plus riche en pierre de taille très-dure qu'en chaux hydraulique, fournit cependant quelquefois des calcaires marneux et des calcaires argilo-magnésiens donnant de la chaux hydraulique.

Les formations du *grès bigarré* et du *zechstein* sont dans le même cas que le muschelkalk.

En remontant encore l'échelle géognostique, arrivé au *terrain de transition*, on ne trouve plus que du calcaire pur.

Les indications précédentes peuvent guider dans la recherche des pierres à chaux hydrauliques; mais, comme souvent au-dessus et au-dessous d'un banc de calcaire argileux se trouve du calcaire pur, on est obligé, pour s'assurer des propriétés de la chaux, d'avoir recours à quelques essais.

Si en traitant le calcaire par l'acide chlorhydrique toute la masse se dissout, on est sûr qu'il ne peut fournir qu'une chaux grasse; si au contraire il reste un produit insoluble, on doit s'attendre à obtenir une chaux maigre; mais pour savoir si elle est hydraulique ou non, il faut faire cuire un échantillon de cette pierre, excepté quand le résidu insoluble est un sable grossier, car alors on est sûr que la chaux ne vaudra rien. Cependant, comme les chaux maigres non hydrauliques sont rares en comparaison des chaux hydrauliques, il y a espoir de succès, dès qu'en obtient un résidu insoluble.

Voici ce que dit M. Vicat au sujet de la recherche des chaux hydrauliques : « Il est peu de départements, les pays granitiques exceptés, où l'on ne puisse rencontrer du calcaire argileux. Il faut le chercher avec persévérance; les indications de MM. les ingénieurs des mines peuvent être d'un grand secours; conclure la non-existence de la pierre à chaux hydraulique de la nature de la masse principale, que les accidents du sol mettent en évidence, serait une erreur; la composition du calcaire varie à chaque instant, et souvent celui que l'on cherche n'est qu'à une petite distance de la pierre à chaux commune; l'une et l'autre se trouvent quelquefois dans la même carrière, séparées seulement par un ou deux bancs. Les renseignements des maçons et des chaufourniers peuvent être d'ailleurs d'un utile concours; si on les interroge sur les

diverses chaux des pays qu'ils habitent, ils ne manquent jamais de désigner les chaux hydrauliques comme les plus mauvaises, il faut insister pour qu'ils en fassent mention. »

333. *Chaux hydrauliques artificielles.* Lorsque les recherches et les essais indiqués au numéro précédent ne conduiront à aucun résultat satisfaisant, on aura recours à la chaux hydraulique artificielle, que l'on fabriquera de toutes pièces, par un des deux procédés que nous allons examiner.

Le premier procédé consiste à mélanger à du carbonate calcaire réduit en bouillie, de l'argile dans les proportions qui donnent à la chaux le degré d'hydraulicité dont on a besoin (531). Ce mélange, réduit en pains et soumis à la cuisson, fournit de bons produits.

Le calcaire marneux est un calcaire ordinairement friable, facile à écraser et à réduire en bouillie. Comme il contient toujours une certaine quantité d'argile, quelquefois assez grande pour produire de la chaux hydraulique ou de la chaux-ciment, on est obligé, pour déterminer la dose d'argile à y ajouter, de le soumettre préalablement à des essais chimiques ou à des essais de cuisson.

On voit que ce procédé exige que la pierre calcaire soit d'abord écrasée. Comme le calcaire marneux et la craie sont seuls susceptibles d'être soumis économiquement à cette opération, en leur absence, on aura recours au second procédé, qui consiste à mélanger une proportion convenable d'argile à de la chaux grasse éteinte et mise à l'état de pâte, et à soumettre ce mélange, réduit préalablement en pains, à une seconde calcination.

D'après M. Vicat, les chaux ordinaires très-grasses peuvent comporter 20 pour 100 d'argile; les chaux moyennes en ont assez de 15 à 10, et 6 suffisent pour celles qui ont déjà quelques qualités hydrauliques. Lorsqu'on force la dose jusqu'à 33 ou 40, la chaux que l'on obtient ne fuse point, mais elle se pulvérise facilement et donne, lorsqu'on la détrempe, une pâte qui prend très-promptement corps sous l'eau. Les qualités de l'argile peuvent d'ailleurs influer aussi sur les proportions.

Une fois que les proportions des matières qui doivent entrer dans la chaux sont déterminées, on en opère le mélange au moyen d'un manége semblable à celui que l'on employait pour la fabrication des mortiers dans les grands chantiers de construction, et dont nous allons donner les dimensions principales.

Ce manége porte trois roues de $1^m,80$ de diamètre, analogues à des roues de voitures, et dont la largeur de jante est de $0^m,15$ pour l'une et $0^m,10$ pour chacune des deux autres. Ces roues tournent dans une auge circulaire dont la section transversale est un segment circulaire; la roue de $0^m,15$ de jante suit le milieu de l'auge, et les deux autres suivent des ornières intérieure et extérieure en empiétant de $0^m,02$ à $0^m,03$ sur celle de la première. L'auge, qui a $1^m,15$ de diamètre intérieur,

1 mètre de largeur et $0^m,38$ de profondeur, est dallée en granit, ou mieux en plaques de fonte pour avoir moints de joints. Les roues peuvent s'élever ou s'abaisser dans l'auge, à l'aide de deux oreilles traversées par un goujon horizontal et fixées sur les deux faces latérales des essieux. Tout le système tourne autour d'un goujon vertical fixé à la partie supérieure d'un arbre en bois maintenu solidement en terre. Un rabot en fer, qui a la forme de la section transversale de l'auge, détache dans son mouvement la matière qui peut se fixer aux parois de l'auge. Ce rabot est disposé de manière à pouvoir s'élever ou s'abaisser librement, selon que la quantité de matière qui se trouve dans l'auge est plus ou moins considérable.

Un tel manége est mû par deux chevaux qui suivent un cercle de $4^m,45$ de rayon ; mais l'on conçoit que, suivant l'importance de l'exploitation, on peut ne mettre que deux roues au manége, en diminuant la largeur de l'auge en conséquence, et opérer la manœuvre avec un seul cheval. La roue la plus large est montée sur un des bras du manége, et les deux autres sur un essieu perpendiculaire aux bras.

Quand le calcaire est écrasé et réduit en bouillie, ou que la chaux est délayée bien également dans l'auget, on y verse, aussi uniformément que l'on peut, la quantité d'argile convenable, et on continue la trituration jusqu'à ce qu'on n'aperçoive plus de parcelles d'argile ; alors on ouvre une vanne pratiquée dans la paroi extérieure de l'auget, et la boue liquide qu'elle contient s'écoule dans une fosse pratiquée à proximité, dans un terrain perméable. Quelques tours de manége, après l'ouverture de la vanne, suffisent pour que le rabot fasse écouler toute la matière par la vanne.

De la première fosse, qui doit avoir de $0^m,60$ à $0^m,80$ de profondeur, on fait couler la matière dans une autre, où on lui laisse acquérir une consistance qui permette de la mettre en pains, soit à la main, soit à l'aide d'un moule. On laisse les pains se dessécher à l'air, à la manière des briques, si ce n'est que leur peu de consistance ne permettant pas de les empiler les uns sur les autres en laissant du jeu entre eux, on est obligé de placer chaque étage de pains sur des lattes reposant sur des entretoises horizontales fixées à des montants qui supportent une toiture.

Les pains une fois desséchés à l'air, on les cuit de la même manière que la chaux naturelle, si ce n'est qu'étant moins compactes, ils sont plus facilement pénétrés par la chaleur et exigent un feu moins vif.

334. *Cuisson de la chaux.* Elle s'opère dans des fours à feu continu, à l'aide de la houille, ou dans des fours à feu discontinu, avec de la houille, de la tourbe ou du bois.

La fig. 19, pl. II, représente la coupe par l'axe d'un four à feu continu. Il a la forme d'un tronc de cône renversé, dont le petit diamètre a au moins 1 mètre, et quelquefois $3^m,30$ comme à Tournay ; le

grand diamètre varie de 2 mètres à 6 mètres, et la hauteur, de 3 mètres à $10^{m},80$.

Pour charger ce four, on commence par former dans le bas du tronc de cône une voûte en pierre calcaire, laquelle est soutenue par deux barres de fer qui forment une espèce de grille. Sur cette voûte on place une couche de houille, et dans le foyer qui est réservé sous la voûte, on enflamme un feu de bois; ce feu allume la première couche de houille, que l'on couvre d'une couche de calcaire, puis d'une couche de houille et ainsi de suite, jusqu'à la partie supérieure du four; mais en ayant soin de ne placer les nouvelles couches qu'au fur et à mesure que le feu s'élève, comme pour la cuisson des briques à la volée (524).

Quand la pierre du bas est cuite, on la fait couler avec un ringard, et on la retire en réglant la vitesse de l'enlèvement sur le temps reconnu nécessaire pour la calcination de la chaux; ce temps est généralement de deux à trois jours. On a soin de mettre de nouvelles couches de calcaire et de houille dans le four, à mesure que la masse s'affaisse.

La quantité de houille brûlée varie de 1,50 à 2 ou 2,25 hectolitres par mètre cube de calcaire. Pour que la calcination soit égale et facile, on casse le calcaire en morceaux de 7 à 8 centimètres de côté. Pour la chaux articielle, les pains peuvent avoir de plus grandes dimensions (533).

La fig. 20, pl. II, représente la coupe verticale par l'axe du four à cuisson continue employé à Tournay. Ce four a 6 mètres de diamètre à la partie supérieure et $3^{m},30$ à la partie inférieure. Le grand diamètre du tronc de cône, à base supérieure arrondie, placé au bas du four pour chasser la chaux cuite vers les huit orifices qui servent à la retirer, a $2^{m},10$. La hauteur totale du four, depuis la base du tronc de cône, est de $10^{m},80$.

Un tel four contient 130 mètres cubes de calcaire, dont les morceaux sont de grosseurs très-variables, il y en a qui pèsent jusqu'à 25 kilog. La chaux reste trois jours dans le four; on brûle de 1,25 à 1,75 hectolitres de charbon de Fresnes, qui est impropre à la fabrication du coke, pour cuire 1 mètre cube de chaux.

On paye $0^{f},36$ au chaufournier pour charger le four, surveiller la cuisson, retirer la chaux du four et la charger en bateau à un relais de distance.

Les voûtes VV′ forment un carré régnant tout autour du four. Le massif du four présente, en plan, un carré à l'intérieur des voûtes, c'est-à-dire en CD, ainsi qu'à l'extérieur en AB. On pénètre sous les voûtes par 3 ouvertures, dont 2 sont placées sur une même face.

Les tablettes qui forment le sol des orifices par lesquels on retire la chaux font des saillies sous lesquelles on fait avancer les brouettes dans

lesquelles on fait tomber directement la chaux; ces brouettes cubent 1 hectolitre.

Si la charge du four ne descend pas partout également, on place des gros blocs de calcaire mélangés de charbon sur la partie qui ne s'affaisse pas; ces blocs, ne se cuisant pas complétement, augmentent la charge dans cette partie, et détachent les morceaux qui se sont accrochés à la paroi. On rend aussi le feu partout uniforme en laissant de plus grands vides entre les pierres que l'on place dans les parties où il est le moins intense.

La chaux cuite dans ces fours se vend de 7 à 9 fr. le mètre cube, quoique l'extraction de la pierre se fasse à la poudre dans des carrières placées au-dessous de la nappe d'eau, ce qui nécessite des épuisements à l'aide de machines à vapeur.

La pierre renferme 10 pour 100 d'argile; c'est un calcaire fétide de la formation oolitique (515).

Les fours à cuisson continue exigent que l'on surveille la marche du feu. Si le vent vient frapper dans la direction de l'orifice du four, il faut masquer cet orifice par des toiles ou des paillassons, car autrement le feu deviendrait trop vif, et la chaux se fritterait.

Dans les localités où la houille manque, on est obligé de cuire la chaux avec du bois dans des fours à feu discontinu.

Pour obtenir une bonne cuisson, avec le moins de combustible possible, M. Petot, ingénieur en chef des ponts et chaussées, a construit, à l'arsenal de Brest, le four à deux compartiments représenté en coupe verticale par la fig. 21, pl. II (*Annales maritimes*, année 1833). C'est par une série d'essais que M. Petot est arrivé à cette forme et aux dimensions suivantes, reconnues les plus favorables :

*Compartiment inférieur.*

| | |
|---|---|
| Diamètre de la grille. . . . . | 4m,95 |
| Hauteur de la grille au-dessus du sol. . . . . | 0 ,50 |
| Diamètre inférieur du compartiment. . . . . | 2 ,55 |
| AA diamètre maximum. . . . . | 3 ,55 |
| Distance de AA à la grille. . . . . | 1 ,30 |
| BB sommet de la charge cuite, diamètre. . . . . | 2 ,24 |
| Distance de BB à AA. . . . . | 3 ,00 |
| Diamètre à la partie supérieure. . . . . | 1 ,70 |
| Distance de BB à l'ouverture du foyer supérieur. . . . | 0 ,50 |
| Entrée du foyer, 0m,40 sur. . . . . | 0 ,40 |
| Entrée du cendrier, 0m,50 sur. . . . . | 0 ,50 |

*Compartiment supérieur.*

| | |
|---|---|
| Diamètre inférieur de ce compartiment. . . . . | 2m,30 |
| Diamètre maximum CC. . . . . | 2 ,46 |
| Distance de CC au seuil de l'ouverture du foyer. . . . | 1 ,30 |
| DD sommet de la charge cuite, diamètre. . . . . | 1 ,55 |
| Distance de DD à CC, . . . . . | 2 ,50 |

| | |
|---|---|
| Distance de DD à l'orifice supérieur. . . . . | 0m,50 |
| Diamètre à l'orifice. . . . . | 1 ,00 |
| Épaisseur de la maçonnerie en EE. . . . . | 2 ,00 |
| *Id.* *id.* en FF. . . . . | 1 ,60 |
| Volume de chaux cuite dans le compartiment supérieur. | 10mc,50 |
| *Id.* *id.* inférieur . | 26mc,50 |
| Largeur des barreaux de grille. . . . . | 0m,03 |
| Distance d'axe en axe des barreaux de grille. . . . . | 0 ,04 |

Pour charger le four, on fait au-dessus de chaque foyer, avec des morceaux de calcaire de 0m,16 à 0m,20 d'épaisseur, une voûte en ogive, représentée dans la figure par une ligne pointée. Sur cette voûte, on entasse le calcaire, de manière que les morceaux diminuent en grosseur, depuis le bas jusqu'en haut, ainsi que du centre au pourtour du four; on prend cette précaution afin de rendre, autant que possible, la cuisson uniforme. Des rondins convenablement placés dans la charge laissent, en se brûlant, des cheminées qui distribuent uniformément la chaleur, en la dirigeant vers les parois; il faut éviter d'en placer au-dessus de l'opposite de l'entrée du foyer, où le courant d'air qui arrive porte naturellement la flamme.

Le four étant rempli, on ferme avec de la maçonnerie le vide du cendrier supérieur, en y laissant seulement un petit regard, que l'on ouvre à volonté, pour examiner au besoin les progrès du chauffage à l'entrée du compartiment supérieur.

Les fagots et le bois refendu conviennent pour ce chauffage, parce que leur flamme longue monte à travers la charge, et que, faisant peu de brasier, il y a moins de chance que la partie inférieure du calcaire dépasse le point convenable de cuisson. On est quelquefois obligé, au commencement du chauffage, d'allumer quelques fagots dans le foyer supérieur pour faciliter le tirage.

Jusqu'à ce que toute la masse soit échauffée, l'eau qui se dégage pendant la combustion, ainsi que le carbone entraîné, se déposent sur les pierres froides, qui deviennent noires; vers cette époque du chauffage, il arrive, si le feu est trop ardent, que les pierres éclatent avec bruit; quand on entend ces explosions, il convient de ralentir le feu jusqu'à ce que les pierres aient perdu leur eau de carrière.

Chaque charge se compose de quatre fagots de 1 mètre de longueur et pesant chacun de 7k,50 à 10 kilog.; on réduit quelquefois ce nombre à trois et d'autres fois on le porte à cinq. On dispose les fagots autour de la grille, en en laissant un dans l'entrée du foyer, de manière que, brûlant par l'extrémité, il fournisse la flamme à la partie antérieure du four, et qu'il brûle les filets d'air qui pénètrent par le contour de la porte et le guichet de 0m,08 à 0m,10 de côté, placé dans le milieu de la maçonnerie de cette porte. Ce guichet sert à voir ce qui se passe dans le foyer; on le ferme à l'aide d'un tampon en terre à brique. Chaque

chargement s'effectue quand il n'y a plus que du brasier sur la grille, et que le courant de flamme amaigri permet de voir les pierres de la voûte; si l'on attendait trop, l'air froid, dont l'arrivée est constante, refroidirait les pierres.

Au bout des dix premières heures de feu, la dépense en combustible reste à peu près constante.

*TABLEAU indiquant la marche de la cuisson; il est analogue à celui donné pour la brique* (524).

| HEURES de chaque quart. | Nombre de fagots brûlés dans le compartiment inférieur pendant le | | | | | | | | | | | | compartim. supér. pendant le | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1er quart | 2e quart | 3e quart | 4e quart | 5e quart | 6e quart | 7e quart | 8e quart | 9e quart | 10e quart | 11e quart | 12e quart | 1er quart | 2e quart | 3e quart |
| 1 | 5 | 35 | 38 | 49 | 43 | 42 | 40 | 41 | 38 | 42 | 39 | 38 | 19 | 35 | 28 |
| 2 | 15 | 33 | 40 | 50 | 40 | 40 | 40 | 43 | 40 | 41 | 40 | 38 | 24 | 32 | 33 |
| 3 | 19 | 36 | 37 | 48 | 40 | 38 | 40 | 41 | 43 | 39 | 42 | 24 | 28 | 36 | 36 |
| 4 | 25 | 34 | 39 | 50 | 45 | 42 | 40 | 39 | 41 | 42 | 40 | » | 31 | 33 | 34 |
| 5 | 28 | 37 | 48 | 40 | 41 | 40 | 42 | 40 | 39 | 43 | 41 | » | 33 | 29 | 34 |
| 6 | 31 | 35 | 51 | 41 | 44 | 40 | 40 | 42 | 40 | 41 | 44 | » | 31 | 31 | » |
| Pour chaque quart. | 123 | 210 | 253 | 278 | 253 | 242 | 242 | 246 | 241 | 248 | 246 | 100 | 166 | 196 | 165 |

Pendant soixante-huit heures et demie de feu dans le compartiment inférieur, on a brûlé 2682 fagots, et pendant dix-sept heures de feu dans le compartiment supérieur, on en a brûlé 527; ce qui fait un total de 3209 fagots pour quatre-vingt-cinq heures et demie de feu. Chaque fagot pesant $9^k,25$, on a donc brûlé 29 683 kilog. de bois pour 37 mèt. cubes de chaux; ce qui fait 802 kilog. par mètre cube.

Comme les pierres du bas sont cuites avant celles du haut, pour éviter leur surcalcination, après vingt ou vingt-quatre heures de feu, on met dans la cuvette K, placée en avant du foyer, de l'eau que l'on élève jusqu'au niveau du cendrier. La vapeur produite par la chaleur que rayonne le foyer, non-seulement empêche la surcalcination, mais aussi facilite le dégagement de l'acide carbonique que peuvent encore contenir quelques morceaux. On ramène dans la cuvette, à l'aide d'un rabot, toute la cendre qui s'entasse dans le cendrier, au-dessus du niveau de l'eau. On maintient le niveau de l'eau constant dans la cuvette, à l'aide d'un réservoir extérieur. La quantité d'eau évaporée pendant la calcination s'élève à 3 mètres cubes environ, déduction faite des pertes par infiltration à travers la maçonnerie.

La vapeur d'eau joue un rôle tel dans la décomposition du carbonate, que si après avoir desséché complétement un morceau de carbonate, on le soumet à la cuisson, sa décomposition est impossible, au lieu que si l'on fait arriver dessus de la vapeur d'eau, le dégagement de l'acide carbonique a lieu immédiatement.

La cuisson de la chaux est opérée quand le tassement de la masse est de $0^m,50$ environ, ou mieux, quand on peut enfoncer dans cette masse une barre de fer avec autant de facilité que dans un tas de chaux. Ces essais se font par l'ouverture placée sous le foyer supérieur; pendant qu'ils durent, on tient hermétiquement fermés le foyer et le cendrier inférieurs, sans quoi, l'air chaud et la flamme sortant par l'ouverture, il serait impossible d'en approcher. Une fois la cuisson terminée dans le compartiment inférieur, on commence le feu dans le foyer supérieur. Ce foyer est sans grille, on place les fagots debout sur la chaux du compartiment inférieur. Pendant toute la durée du feu dans le foyer supérieur, on ne laisse qu'une ouverture de $0^m,10$ au cendrier inférieur, et le cendrier supérieur se tient fermé. Quand la cuisson est également opérée dans ce compartiment, ce qui se vérifie plus facilement que pour le compartiment inférieur, mais par des moyens semblables, on arrête le feu, on ferme hermétiquement tous les orifices, et douze heures après on commence à défourner.

535. *Extinction de la chaux.* On distingue cinq manières de l'opérer, nous allons les passer en revue (544).

1° *Extinction par fusion* ou *extinction ordinaire.* Elle consiste à placer la chaux dans un bassin avec la quantité d'eau convenable, et à l'agiter pour réduire le tout en pâte. Il faut avoir soin, pour les chaux grasses, de verser en une seule fois toute l'eau nécessaire, afin de n'être pas obligé d'en ajouter pendant l'effervescence. Dans le cas de nécessité d'une nouvelle quantité d'eau, il faut attendre le refroidissement pour l'ajouter. La méthode qui consiste à noyer la chaux d'une grande quantité d'eau et à la faire couler dans un bassin perméable doit être proscrite.

Ce procédé ne peut être usité pour la chaux hydraulique, elle fuse trop lentement; on l'emploie généralement pour la chaux grasse, parce qu'elle foisonne plus que par les autres procédés; mais il convient, pour qu'elle donne une bonne maçonnerie, d'y mélanger un peu de pouzzolane.

Sur les grands chantiers, les bassins se font en maçonnerie; dans les autres cas, on les fait en plabords maintenus par des chevillettes en fer ou par des piquets en bois, en ayant soin de les garnir de glaise ou de plâtre pour empêcher l'eau de sortir.

Lorsque la chaux doit être conservée après son extinction, il faut la recouvrir d'une couche de sable que l'on humecte de temps en temps.

2° *Extinction ordinaire modifiée pour l'emploi de la chaux hydraulique*, d'après M. Vicat. La chaux hydraulique, prise vive et en pierre, se jette à la pelle dans un bassin imperméable, où on l'étend par couches d'égale épaisseur (de 20 à 25 centimètres); on y amène l'eau au fur et à mesure, et de telle manière qu'elle puisse circuler et pénétrer avec facilité dans les vides que les fragments de chaux vive laissent entre eux. L'effervescence ne tarde guère à se manifester. On continue à jeter alternativement de la chaux et de l'eau, mais en ayant bien soin de se garder de brasser la matière et de la réduire en laitance, selon la mauvaise habitude de quelques maçons; seulement, quand, par hasard, quelques parties de chaux fusent à sec, on y dirige l'eau par des

rigoles que l'on trace légèrement dans la pâte avec une pelle, et de temps en temps on enfonce un bâton pointu dans les endroits où l'on soupçonne que l'eau a pu manquer. Si le bâton en sort enduit d'une chaux gluante ; l'extinction est bonne ; s'il s'en élève au contraire une fumée farineuse, c'est que la chaux fuse à sec ; on élargit alors le trou, on en fait d'autres à côté et on amène l'eau.

On ne doit ainsi éteindre que la quantité de chaux hydraulique dont on a besoin pour la consommation d'une journée. Deux bassins séparés, ou deux capacités dans le même bassin sont indispensables. On remplit l'un quand l'autre est près d'être vidé. C'est ordinairement sur la fin du jour que l'extinction a lieu ; par ce moyen, la chaux a vingt-quatre heures pour travailler, et les morceaux paresseux se divisent tous.

La chaux ainsi éteinte est déjà très-ferme le lendemain, il faut la piocher ou au moins la couper avec une pelle tranchante pour l'extraire. Il semble qu'en cet état elle ne puisse plus être ramenée à l'état de pâte sans une addition d'eau, mais c'est une erreur.

Si au lieu d'être prise vive, la chaux hydraulique a déjà subi l'immersion, les bassins deviennent inutiles ; on règle la dose d'eau de manière à atteindre à peu près le même degré de consistance que par l'autre procédé.

Le procédé qui vient d'être décrit est généralement usité pour la chaux hydraulique ; cependant, certaines chaux hydrauliques, entre autres celles de Senonches, ne donnent pas de bons résultats quand elles sont éteintes de cette manière ; il vaut mieux avoir recours à l'aspersion, la prise est infiniment plus prompte.

3° *Extinction par aspersion.* Elle consiste à placer la chaux dans des bassins circulaires formés avec du sable ; à l'asperger, à l'aide d'un arrosoir à pomme, d'une quantité d'eau suffisante pour la réduire en pâte ; à la couvrir immédiatement avec le sable, et à ne l'agiter et fabriquer le mortier que quand la fusion est complète. Dans cette extinction, si la chaux est grasse, il se produit un grand dégagement de chaleur qui paraît faciliter l'extinction, qui est incomplète au bout de deux ou trois heures. Il n'y a que des essais comparatifs qui peuvent faire donner la préférence à ce mode d'extinction ou au précédent.

Ce procédé est beaucoup employé par les paveurs et les maçons de province ; mais pour les chaux hydrauliques il a rarement la préférence sur le mode précédent.

4° *Extinction par immersion.* Elle consiste à réduire la chaux vive en morceaux de la grosseur d'une noix, à la placer dans un panier, que l'on plonge dans l'eau, en l'y tenant jusqu'à ce que la superficie de l'eau commence à bouillonner ; alors on le retire, on le laisse égoutter un instant et on verse la chaux dans des caisses ou des futailles qui concentrent la chaleur. Une grande partie de l'eau ne pouvant s'échapper, elle est prise par la chaux, qui se réduit en poudre et que l'on convertit ensuite en pâte.

Ce procédé n'a pas sur les qualités de la chaux l'influence qu'on lui avait attribuée, et comme il est coûteux, il est très-rarement employé.

5° *Extinction spontanée.* Elle consiste à laisser la chaux exposée à l'air, dont elle absorbe l'humidité, en se transformant en hydrate. Cet hydrate contient 0,22 de son poids d'eau, et en y ajoutant de l'eau, on obtient une pâte susceptible d'être employée. Ce mode d'extinction convient aux chaux grasses, car l'exposition à l'air transforme quelques particules en carbonate de chaux, ce qui facilite le durcissement. On ne doit pas l'employer pour la chaux hydraulique, cette chaux perdant ses qualités à l'air ; c'est pour cette raison qu'on ne peut conserver la chaux éteinte par ce procédé que pendant un certain nombre de mois, et encore en prenant toutes les précautions possibles pour la préserver du contact de l'air et de l'humidité.

**336.** *Foisonnement de la chaux.* Le foisonnement à l'extinction est variable suivant l'espèce de chaux et le mode d'extinction employé.

Les chaux non hydrauliques très-grasses, éteintes en bouillie épaisse par fusion, prennent un volume qui atteint 2,5 à 3 fois celui de la chaux

vive prise en morceaux avec les vides; pour des chaux maigres, le volume de la pâte n'est que 1,50 et même 1,25 fois le volume primitif.

Pour les chaux hydrauliques, le foisonnement est également très-variable. L'expérience a donné les résultats du tableau suivant :

| DÉSIGNATION DE LA CHAUX HYDRAULIQUE. | MODE D'EXTINCTION. | VOLUME après l'extinction. |
|---|---|---|
| Naturelle de Bourgogne. . . . . | Fusion. | 1.55 |
| *Id.* . . . . . | Immersion. | 1.85 |
| Naturelle des buttes Chaumont. . . . . | Fusion. | 1.50 |
| *Id.* . . . . . | Immersion. | 1.78 |
| Artificielle des buttes Chaumont. . . . . | Fusion. | 1.59 |
| *Id.* . . . . . | Immersion. | 1.75 |
| Naturelle d'Issy. . . . . | Fusion. | 1.62 |
| Naturelle des Moulineaux. . . . . | *Id.* | 1.47 |

En général 100 kilogr. de chaux grasse très-pure et très-vive donnent $0^{mc},24$ de pâte; mais si la cuisson date de plusieurs jours et que la chaux ne soit pas très-pure, ce rendement descend jusqu'à $0^{mc},18$.

**337.** *Ciment hydraulique* ou *pouzzolane.* Sous ce nom, on désigne un produit volcanique provenant de débris de laves poreuses ou dures, telles que les basaltes. Nous avons donné leurs propriétés 4°, page 699.

La pouzzolane varie de couleur; il y en a de la blanche, de la noire, de la jaune, de la grise, de la brune et de la violette ; celle de Rome est d'un rouge brun mêlé de particules brillantes comme du métal.

*Composition des pouzzolanes les plus connues (Traité des mortiers, ciments et pouzzolanes,* par M. Vicat).

| POUZZOLANES. | Sable mixte. | Silice. | Alumine. | Magnésie. | Peroxyde de fer. | Chaux. | Eau. | Principes alcalins et volatiles. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Traass des bords du Rhin. . . | 8.75 | 46.25 | 20.74 | 1.00 | 5.48 | 2.15 | 9.25 | 6.30 |
| Pouzz. de Rome. . . . . | 5.00 | 47.66 | 14.33 | 3.86 | 10.33 | 7.66 | 7.03 | 4.13 |
| *Id.* du Vésuve, brune. . . . | 20.00 | 24.50 | 15.75 | Traces | 16.30 | 8.96 | 3.50 | 11.00 |
| *Id.* gris foncé. . . . . | 1.50 | 44.50 | 16.50 | 3.00 | 15.50 | 10.00 | 5.00 | 4.00 |
| *Id.* gris clair. . . . . | 2.50 | 42.00 | 15.50 | 4.40 | 12.50 | 9.50 | 33.33 | 10.27 |
| *Id.* du Vivarais, grise. . . | 3.95 | 35.09 | 17.65 | 3.17 | 16.82 | 4.26 | 19.06 | » |
| *Id.* de l'Hérault, brune. . . | 4.50 | 38.50 | 18.35 | » | 14.90 | 8.70 | 7.75 | 7.30 |
| *Id.* de l'île Bourbon, brune. | 1.00 | 25.67 | 16.33 | Traces | 40.00 | » | 17.00 | » |
| *Id.* du Vivarais, brune. . . | 7.48 | 30.73 | 14.63 | 2.49 | 24.92 | 3.73 | 19.02 | » |

Les pouzzolanes fournies par les anciens volcans de l'Auvergne et du Vivarais sont de qualités très-médiocres.

**338.** *Fabrication de la pouzzolane artificielle.* Un composé d'une à

trois parties de chaux pour neuf à sept d'argile, soumis à une chaleur nécessaire au premier degré de cuisson de la brique, un peu supérieure au rouge sombre, donne la pouzzolane 531).

Comme pour la chaux hydraulique (533), quand on n'a pas de matières qui renferment naturellement ces proportions, on peut préparer la pouzzolane de toutes pièces; c'est ce que l'on a fait au pont-aqueduc de Guétin, sur l'Allier, et à celui de Digoin, sur la Loire, où les matières employées étaient composées d'une partie en volume de chaux grasse cuite et éteinte à l'état de pâte molle, et de quatre parties d'argile, ou plutôt d'une terre argileuse trouvée sur les lieux et amenée par une addition d'eau à la même consistance que la chaux. On opérait ensuite le mélange de ces matières, en les maintenant à la consistance de pâte à brique ordinaire, à l'aide d'un manége à deux roues, semblable à celui employé sur les grands ateliers, à la fabrication du mortier, et dont il a été question pour opérer le mélange des matières employées à la fabrication de la chaux hydraulique artificielle (533).

Le fond de l'auge du manége avait $0^{m},20$ de largeur, et son rayon moyen $1^{m},50$; les roues avaient $0^{m},10$ de largeur de jante, et leurs ornières empiétaient de $0^{m},02$ à $0^{m},03$ l'une sur l'autre. Deux hommes rejetaient dans l'intérieur de l'auge les matières qui s'attachaient à ses parois et aux roues; une charrue est peu avantageuse, à cause de la facilité avec laquelle les matières s'y fixent.

La charge de l'auge était de $0^{mc},60$, et son mélange durait une heure. Un cheval décrivant un cercle de 5 mètres de rayon suffisait pour conduire le manége en travaillant de huit à dix heures par jour.

Une fois les matières mélangées, on les mettait en pains de la forme d'un prisme triangulaire, au moyen d'un moule imaginé par M. Saint-Léger. Deux hommes fabriquaient en une journée de douze heures de travail 3000 à 3500 pains, dont 650 formaient le mètre cube.

Les pains une fois moulés, on les desséchait en les exposant au soleil; par un beau temps d'été, la dessiccation durait de sept à huit jours. Après cette opération, on emmagasinait les pains sous un hangar couvert, pour les mettre à l'abri de la pluie.

La cuisson s'opérait avec de la houille, mais l'on peut employer le bois. On avait soin de ménager le feu, surtout au commencement de l'opération et jusqu'à la parfaite dessiccation des pains. Avec un petit feu bien conduit, la cuisson d'une fournée peut durer de trente à quarante heures. La cuisson s'opère dans des fours semblables à ceux qui servent à cuire la chaux au moyen du bois (534).

Au pont-aqueduc de Guétin, on a fait usage d'un double four représenté en coupes verticale et horizontale par les fig. 22 et 23, planche II. Sur les faces inclinées du massif qui sépare les deux foyers, on fait des cannelures avec des briques de champ; ces cannelures, faisant office de cheminées, font que la flamme arrive aussi facilement dans le

milieu du four que dans les parties qui se trouvent au-dessus des foyers.

On supporte la charge, au-dessus des foyers, à l'aide de voûtes à claire-voie en briques réfractaires.

Un tel four peut contenir 7000 pains, qui fournissent de quoi faire environ 10 mètres cubes de pouzzolane. Il faut un jour pour le charger, un jour et demi pour la cuisson, et deux jours et demi pour le refroidissement du four et le déchargement, ce qui fait cinq jours par fournée.

M. Saint-Léger a encore établi des fours plus petits que le précédent et qui portent des séchoirs où on opère la dessiccation des pains avant la cuisson ; mais ils sont moins avantageux que le précédent. Du reste, en prenant un peu l'avance pour le mélange des matières et la dessiccation naturelle des pains, on peut, en général, dans la saison des travaux, se passer de ces séchoirs.

A Digoin, pour pulvériser la pouzzolane, M. Saint-Léger a fait usage d'un manége garni d'une meule en pierre du poids de 650 à 700 kilog. La meule se mouvait sur une plate-forme entourée d'une auge, contre la paroi intérieure de laquelle se trouvait un tamis incliné. Un soc de charrue agitait la matière derrière la meule, et une planche convenablement disposée la faisait tomber de temps en temps sur un tamis destiné à séparer les parties encore trop grosses de la matière convenablement broyée ; les parties rejetées par le tamis étaient replacées sous la meule.

Un pareil manége peut, en douze heures de travail, pulvériser de 2 mèt. cubes à $2^{mc},50$ de pouzzolane. M. Mary pense que l'on obtiendrait de meilleurs résultats de pulvérisation au moyen de cylindres à disques en fonte isolés tant pleins que vides, que l'on ferait rouler sur une plate-forme où l'on aurait répandu la matière ; ces disques diviseraient la matière, au lieu d'en faire une masse compacte comme la meule. Ces cylindres sont employés par M. Payen, à Grenelle, pour pulvériser de la matière désinfectante ; les disques ont $0^{m},02$ d'épaisseur et ils sont écartés d'autant ; leur diamètre est de $0^{m},40$ environ.

A Guétin, le prix d'un mètre cube de pouzzolane, non compris les frais d'établissement faits par l'administration, s'est élevé à 28 fr., et au point de Digoin, à 26 fr. Ces prix comprennent les achats de terre et de chaux, leur transport, leur mélange, la fabrication des pains ; la cuisson, qui exige environ trois hectolitres de houille, estimés seulement à 3 fr. 50 pour Digoin, par mètre cube de pouzzolane ; la pulvérisation, la livraison à la régie dans des caisses de dimensions déterminées, le transport de la matière dans les différents points de l'atelier ; l'entretien des fours, manéges et hangar ; enfin, les frais d'outils et les bénéfices, qu'à Digoin on a cotés ensemble à 3 fr. 40 par mètre cube de pouzzolane.

*Frais d'établissement d'un matériel destiné à fournir de 2 à 2,50 mètres cubes de pouzzolane par jour.*

| | |
|---|---|
| Manége à mélanger l'argile et la chaux. . . . . | 500 fr. |
| Un four avec ses abords. . . . . | 600 |
| Un hangar pour abriter les pains avant leur cuisson. . . . . | 300 |
| Un manége à pulvériser, avec un hangar assez étendu pour recevoir d'un côté la pierre à pulvériser, et de l'autre l'approvisionnement de pouzzolane pulvérisée. . . . . | 2600 |
| Total. . . . . | 4000 fr. |

Pour des travaux de peu d'importance, on ne peut faire des frais aussi considérables; on se contente de cuire la pouzzolane dans un four ordinaire à chaux ou à briques, sauf à avoir quelques briquettes vitrifiées par l'effet des cendres de charbon qui aident à la fusion de la silice.

La pouzzolane se conserve plus facilement avant d'être employée que la chaux hydraulique, et, de plus, elle permet de donner au mortier le degré d'énergie dont on a besoin, ce qui est impossible avec la chaux hydraulique.

**339.** *Fabrication de pouzzolanes artificielles avec diverses matières.* M. Vicat rapporte que l'on a fabriqué de la pouzzolane avec une terre dolomitique. Cette terre, exploitée par entailles et coins de bois, se subdivisait en petites mottes que l'on séchait au soleil ou sous des hangars pour les cuire ensuite dans un four à chaux ordinaire. La cuisson exigeait un hectolitre de charbon pour seize à dix-huit hectolitres de terre.

*Détail des dépenses pour la campagne entière.*

| | | |
|---|---|---|
| Construction du four. . . . . | 110 fr. | 00 c. |
| *Id.* du hangar. . . . . | 167 | 70 |
| Exploitation. . . . . 582 jours 1/2. . . . . | 707 | 40 |
| Cuisson. . . . . 202 *id.* . . . . . | 309 | 50 |
| Pilonage par des femmes, 281 *id.* . . . . . | 204 | 75 |
| Surveillance. . . . . | 200 | 00 |
| Houille, 130 quintaux métriques. . . . . | 174 | 00 |
| Outils. . . . . | 85 | 25 |
| Dépenses diverses. . . . . | 7 | 75 |
| Dépense totale pour 211$^{mc}$,75 de pouzzolane. . . . . | 1966 fr. | 35 c. |
| Ce qui fait par mètre cube. . . . . | 9 fr. | 28 c. |

A Calais, on fabrique de l'excellente pouzzolane en cuisant de la terre argilo-calcaire provenant des plages de la mer. Cette terre est produite par les vases calcaires qui résultent de la destruction des falaises de la côte de Normandie et du limon argileux provenant, soit des alluvions des cours d'eau, soit des couches d'argile couvrant le sommet des falaises. Cette terre s'extrait dans la plage, se sèche et se cuit comme la pâte de pouzzolane artificielle (538).

A Brest, où il existe des masses considérables de sables de gneiss granitiques, on a soumis ce sable à une légère torréfaction dans des fours à réverbère, et on a obtenu une pouzzolane, non très-énergique, mais cependant assez pour que, mélangée à la chaux, le mortier durcisse en sept jours.

Ces sables torréfiés se composent de :

| | |
|---|---|
| Silice. . . . . | 60,33 |
| Alumine.. . . . . | 21,43 |
| Peroxyde de fer. . . . . | 8,57 |
| Chaux et magnésie. . . . | 6,69 |
| Principes solubles. . . . . | 2,75 |

**340.** *Ciment romain.* Depuis plusieurs années on emploie avec de grands avantages, dans les constructions hydrauliques, une substance désignée vulgairement sous le nom de *ciment romain* (531), qui possède à un degré supérieur toutes les propriétés des chaux hydrauliques : ainsi le mortier fait avec cette matière acquiert presque instantanément, à l'air et dans l'eau, une plus grande dureté et imperméabilité, et il adhère encore mieux aux matériaux de construction.

*TABLEAU de la composition de quelques ciments très-employés en France et en Angleterre* (*Traité des mortiers*, etc., par M. Vicat). Quelques-uns des ciments de ce tableau atteignent une très-grande dureté, mais d'autres sont moyens et même médiocres. M. Vicat pense ces derniers susceptibles d'une grande amélioration, par le seul effet d'une cuisson mieux appropriée à leur composition particulière.

| PRINCIPES composants sur 100 parties. | D'Urrugne ou Guetary naturel. | Portland anglais artificiel. | Butte Chaumont (Paris). | Boulogne dit Portland. | Vassy (Yonne). | Ciments de l'Isère. | Vitry-le-François. | Médina Parker nouveau. | Pouilly (Auxois). | Boulogne ancien. | Cahors (Lot). |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Chaux. . . . . | 63.44 | 62.05 | 62.040 | 61.75 | 59.50 | 58.077 | 55.70 | 43.45 | 49.600 | 49.283 | 44.45 |
| Magnésie. . . . . | 1 11 | Traces | 2.371 | Traces | Traces | 6 800 | Traces | 13.95 | » | 2.582 | 4.80 |
| Matières inertes.. . | » | » | » | 1.00 | » | » | » | » | » | 4.300 | » |
| Silice. . . . . | 22.75 | 22.50 | 22.765 | 25.10 | 17.75 | 20.887 | 20.00 | 19.50 | 26.000 | 28,020 | 26.00 |
| Alumine. . . . . | 8 75 | 6.50 | 8 254 | 7.25 | 6.80 | 8.000 | 9.77 | 5.60 | 10.000 | 9.575 | 12.15 |
| Peroxyde de fer. . | 3.75 | 3.85 | 4.570 | 4.50 | 7.35 | 3.436 | 4.33 | 12.05 | 5.100 | 5.726 | 5.50 |
| Acide carbonique. . | » | 3.10 | » | » | 3.80 | » | 4.00 2.50 | 2.50 | 7.250 | » | 4.58 |
| Eau. . . . . | » | | | | | | | | | | |
| Principes alcalins.. | » | 0.80 | » | 0.40 | » | » | 3.50 | 2.15 | 1.19 | » | 1.20 |
| Acide sulfurique. . | 0.20 | 1.20 | Traces | » | 5.00 | 2.80 | 0.20 | 0.80 | 0.850 | 0 514 | 1.32 |
| Rapport de l'argile à la chaux. | 0.51 | 0.46 | 0.54 | 0.52 | 0.41 | 0.65 | 0.53 | 0.90 | 0.72 | 0.84 | 0.96 |

Les ciments que l'on emploie de préférence dans les constructions hydrauliques sont tirés de Vassy-lèz-Avallon (Yonne), de Pouilly et de Molêmes.

Le ciment de Vassy est celui qui est le meilleur : aussi la plupart des devis le prescrivent-ils pour l'exécution des travaux hydrauliques. Le ciment de Pouilly est noir après son emploi ; celui de Molêmes est le moins estimé.

M. Gariel, successeur de MM. Gariel et Garnier, est propriétaire des carrières de ciment de Vassy ; il fabrique seul dans la localité ce produit précieux, et il l'exploite sur une très-grande échelle. Dans la note suivante, nous allons examiner les propriétés de cette matière et les principales applications qui en ont été faites.

Le ciment de Vassy a été découvert en 1831 dans le hameau de ce nom, commune d'Étaules, près Avallon (Yonne).

On le trouve sous la forme d'une pierre argilo-calcaire de couleur grisâtre, dont la composition chimique est, d'après une analyse déjà ancienne

| | |
|---|---|
| Carbonate de chaux. . . . . | 63,8 |
| *Id.* de magnésie. . . . . | 1,5 |
| *Id.* de fer. . . . . | 11,6 |
| Silice. . . . . | 14,0 |
| Alumine. . . . . | 5,7 |
| Eau et matières organiques. . . | 3,4 |
| | 100,0 |

Réduit par la calcination dans des fours à chaux ordinaires, il perd à peu près 40 pour 100 de son poids ; sa couleur devient jaune terne, et il donne à l'analyse :

| | |
|---|---|
| Chaux. . . . . | 56,6 |
| Protoxyde de fer. . . . . | 13,7 |
| Magnésie. . . . . | 1,1 |
| Silice. . . . . | 21,2 |
| Alumine. . . . . | 6,9 |
| Perte. . . . . | 0,5 |
| | 100,0 |

Après la calcination, on pulvérise le ciment à l'aide de manéges à meules verticales analogues à ceux employés pour la fabrication de la pouzzolane artificielle (538) On le tamise dans un blutoir à toile en cuivre de 18 fils par centimètre, et on l'enferme dans des barriques goudronnées et garnies de papier à l'intérieur pour en faciliter le transport et en assurer la conservation. En cet état, on peut le conserver pendant plus d'une année sans qu'il ait rien perdu de ses qualités essentielles, pourvu qu'on ait eu soin de le placer dans un lieu bien sec et hors de contact avec le sol.

Le ciment de Vassy contracte par la compression dans les barriques une certaine adhérence avec lui-même, et d'autant plus grande que le ciment est moins frais. On est quelquefois obligé, pour le retirer des barriques, d'employer des pointes de fer, et il ne reprend pas parfaite-

ment de lui-même son état pulvérulent ; il faut assez souvent, pour cela, avoir recours à la truelle du gâcheur. Un résultat analogue se produit par suite d'avaries ; mais, dans ce cas, il est encore plus difficile de retirer le ciment des barriques, et sa couleur est devenue blanchâtre. Pour qu'il puisse être réputé non avarié et propre à un bon emploi, il faut que ses fragments non désagglomérés cèdent facilement sous la pression des doigts et que sa couleur n'ait éprouvé aucune altération.

L'avarie du ciment ayant pour cause principale l'humidité de l'air ambiant, elle se manifeste d'abord au contact des parois de la barrique puis gagne lentement, mais progressivement, jusqu'au centre ; il arrive donc assez souvent qu'une barrique avariée à la surface renferme au centre du ciment très-bon et très-bien conservé.

Le ciment en poudre est très-compressible ; il s'affaisse facilement sous son propre poids, surtout si on agite par des chocs le vase qui le contient. Aussi sa pesanteur spécifique est-elle très-variable, comme le fait voir le tableau suivant :

| | Densité. |
|---|---|
| Mesuré très-libre, litre par litre, à la sortie du blutoir. . . . . | 0,80 |
| Comprimé dans les barriques pour être livré à la consommation. . . | 1,18 |
| Au delà de ce degré de compression, il acquiert avec le temps une force d'expansion suffisante pour briser l'enveloppe. | |
| On peut par la compression arriver à. . . . . | 1,50 |
| Dans cet état, les barriques se briseraient promptement. | |
| Retiré des barriques et mesuré immédiatement par petites parties au moment de l'emploi, de nombreuses expériences ont donné. . . . | 0,96 |
| Ce dernier chiffre doit être pris pour base de tous les calculs de sous-détails de travaux. | |

La quantité de mortier obtenu est à peu près proportionnelle au poids du ciment employé ; c'est pour cette raison que le prix de celui-ci est fixé d'après le poids et non sur volume.

Il est d'usage, dans le commerce du ciment, de compter le poids des barriques au même prix que leur contenu.

Le rapport du poids de l'enveloppe au poids total varie de 0,08 à 0,12, suivant la densité et l'épaisseur du bois ; soit 0,1 en moyenne.

Le ciment s'emploie sous la forme de mortier, avec ou sans sable, en y ajoutant une quantité d'eau égale à environ la moitié de son volume. La quantité d'eau varie légèrement, suivant la température et d'après le degré d'humidité du sable.

Un mètre cube de ciment en poudre à la densité 0,96, converti en mortier sans mélange de sable, perd 17 pour 100 de son volume et donne seulement $0^{mc},83$ de mortier.

On emploie rarement le ciment pur ; on le mélange ordinairement avec une certaine quantité de sable dur et purgé de vase et de toute matière terreuse. On obtient par ce moyen un mortier plus résistant,

moins exposé à se fendiller à la surface et beaucoup plus économique.

Ordinairement le mortier est composé de volumes apparents égaux de sable et de ciment; mais lorsqu'il doit résister à une forte pression d'eau, il convient d'élever la dose de ciment dans le rapport de 3 pour 2 de sable, et même dans celui de 2 à 1 pour de très-fortes charges d'eau. 2 parties de ciment pour 3 parties de sable donnent encore un très-bon mortier, quoique plus maigre.

Les mortiers en ciment pur ne s'emploient guère que dans les cas qui exigent un durcissement instantané, comme, par exemple, l'étanchement de sources dans les radiers des bassins et écluses ou autres cas analogues.

La prise du mortier de ciment de Vassy gâché à la sortie du blutoir, immédiatement après la fabrication, sans mélange de sable, s'opère en moins d'une minute; l'ouvrier le plus habile n'a pas le temps de l'employer dans de bonnes conditions. Cet intervalle entre le moment du gâchage et celui du durcissement augmente avec l'âge du ciment, l'abaissement de la température et la quantité de sable, surtout si celui-ci est humide, et il peut s'étendre jusqu'à une demi-heure en été et une heure en hiver, sans que le ciment ait rien perdu de ses autres qualités.

Au moment où commence le durcissement, et pendant que s'opère la combinaison, la température du mortier atteint quelquefois 65° quand le ciment est gâché pur.

La résistance du mortier de ciment à la pression a été constatée par l'écrasement de prismes de $0^m,16$ de longueur, $0^m,08$ de largeur et $0^m,054$ d'épaisseur fabriqués depuis deux ans et demi. Dix expériences successives ont donné pour limites supérieure et inférieure de résistance 197 et 121 kilog., et en moyenne 150 kilog. par centimètre carré.

D'autres expériences sur des mortiers de deux mois ont donné pour résistance à la traction 10 kilog. par centimètre carré. Cette résistance augmente notablement avec le temps.

Le mortier de ciment gâché et appliqué convenablement est à peu près imperméable. Cette propriété augmente dans un certain rapport avec l'épaisseur, et diminue au contraire avec une trop forte dose de sable. Un enduit de 5 centimètres d'épaisseur, composé de trois parties de ciment pour deux parties de sable, peut supporter sans déperdition une charge d'eau de 5 à 6 mètres de hauteur.

Les quatre propriétés fondamentales : *résistance à l'écrasement*, *adhérence*, *imperméabilité* et *durcissement rapide* se rencontrent à un haut degré dans le ciment de Vassy, et lui donnent une grande importance dans les constructions de toute nature, et particulièrement dans les grands travaux hydrauliques. On l'emploie :

1° Pour la restauration ou la consolidation de toutes espèces de maçonneries, de moellon, brique ou pierre de taille, quel que soit leur état de dégradation;

2° Pour la construction de voûtes de ponts, d'aqueducs, d'églises, etc., surtout quand ces voûtes doivent satisfaire à des conditions de légèreté et de solidité;

3° Pour enduits de réservoirs, citernes, fosses d'aisances, appartements humides, radiers d'aqueducs ou d'écluses, crépis de murs;

4° Pour travaux à la mer et en rivière, comme rejointements, revêtements de parements dégradés par les vagues, et même pour maçonneries neuves executées dans l'intervalle des marées;

5° Pour toute espèce de scellement;

6° Enfin, pour rendre hydrauliques les chaux grasses et pour augmenter l'hydraulicité des chaux maigres.

L'emploi du ciment de Vassy exige des soins très-minutieux et des habitudes pratiques longues et soutenues; les ouvriers ordinaires y réussissent d'autant plus difficilement que les procédés de préparation et d'application de cette matière diffèrent davantage de leurs habitudes.

Trois choses essentielles sont à observer dans l'emploi du ciment: 1° la préparation des surfaces sur lesquelles on veut l'appliquer; 2° le gâchage; 3° l'application. Si une seule de ces opérations est manquée, le succès est compromis.

*Préparation des surfaces.* Les surfaces destinées à recevoir une application de ciment doivent avoir été préalablement nettoyées, et, au besoin, repiquées, pour en ôter toutes les parties altérées et tous les vieux mortiers; les joints doivent être dégradés carrément à la profondeur de 2 ou 3 centimètres, et par un lavage complet on doit en faire disparaître jusqu'aux derniers vestiges de poussière; il faut même, si les surfaces lavées ont eu le temps de sécher, les mouiller de nouveau quelques instants avant l'emploi du ciment. La brique destinée à être employée avec le mortier de ciment doit avoir séjourné dans l'eau pendant un quart d'heure, et en avoir été retirée quelques minutes avant de s'en servir.

*Gâchage.* Il se fait à la truelle, dans des auges en forme de caisses carrées, à trois côtés relevés ou rebords, le côté ouvert faisant face à l'ouvrier. Le sable et le ciment, dont le volume total peut varier de 1 à 6 litres pour chaque gâchée, selon la nature des travaux, doivent être mêlés à sec dans l'auge, et le mélange disposé en forme de digue pour retenir l'eau, qu'on verse, s'il est possible, en une seule fois sur le ciment, au lieu de jeter le ciment dans l'eau comme on le fait pour le plâtre. On pousse alors rapidement par petites parties avec le bout de la truelle tout le ciment sur l'eau, qui ne tarde pas à être absorbée; puis on agite le tout avec la truelle pour former un mélange préparatoire, et après avoir repoussé toute la pâte d'un côté de l'auge, on la fait passer successivement par petite partie sous le plat de la truelle, afin d'en broyer et triturer jusqu'aux dernières parcelles; on repousse de nouveau la matière vers l'autre côté de l'auge, en ayant soin de relever les bords de la pâte sur le milieu, et on recommence dans le sens opposé à passer le ciment sous le plat de la truelle. Pour un gâ-

cheur très-attentif et très-agile, ces deux opérations peuvent suffire; mais avec des gâcheurs ordinaires, le ciment doit être repassé trois et même quatre fois.

Le gâchage du ciment doit se faire par le travail du poignet et non force d'eau. Au premier tour, le mortier présente l'aspect d'une pâte ferme qui se ramollit sensiblement par la trituration; au dernier tour, il doit avoir la consistance d'une pâte très-molle dont la surface paraît légèrement huileuse.

Pendant les chaleurs de l'été (époque peu favorable à l'emploi du ciment, surtout si on n'est pas à l'abri du soleil), les matériaux étant très-secs, il faut un peu plus d'eau que dans les saisons froides et humides; ainsi, en temps pluvieux et froids, il convient de gâcher le ciment un peu plus ferme afin d'en hâter la prise, et ce doit être le contraire en été, si l'on veut que le mortier ne prenne pas trop vite; mais il faut se garder, dans tous les cas, de l'employer liquide.

La saison froide et humide est la plus convenable pour l'emploi du ciment; les petites gelées même ne sont pas nuisibles si le travail est à l'abri de la pluie. Quand, dans ce dernier cas, l'eau est trop froide, la prise du ciment étant très-lente, on peut y remédier en la faisant tiédir.

L'application du ciment se fait avec la truelle, par jets, à la manière des maçons limosins. On doit proscrire l'emploi de la taloche, et il ne faut lisser la surface du mortier que dans certains cas particuliers, et très-légèrement, comme, par exemple, lorsqu'il s'agit d'enduits de réservoirs. Ce lissage ferme les pores à la surface et complète les soudures; mais il donne lieu à des gerçures quand la dessiccation est trop prompte. Cette opération doit se faire avant que le mortier ait commencé à s'échauffer et à durcir; dès que la chaleur a commencé à se développer, ou que le mortier devient plus ferme, on n'y doit plus toucher. Toutefois, lorsque le ciment a produit tout son effet et que le durcissement est complet, on peut sans inconvénient, si le coup d'œil l'exige, comme dans les travaux de restauration de maçonnerie de pierre de taille, ou pour des enduits simulant la pierre, dresser les surfaces par un râclage au moyen de la truelle bretée, et même tailler le mortier au ciseau à la manière de la pierre d'appareil.

Le tableau ci-après donne les quantités relatives de sable et ciment pour diverses compositions de mortier.

*TABLEAU de la composition du mètre cube de quelques mortiers de ciment romain.*

| NUMÉROS. | PROPORTIONS EN VOLUME | | VOLUME de sable. | POIDS DE CIMENT, déchet compris. | |
|---|---|---|---|---|---|
| | de ciment. | de sable | | sans tare. | avec tare. |
| | | | m. c. | kil. | kil. |
| 1 | 1 | 0 | 0.00 | 1204 | 1336 |
| 2 | 3 | 1 | 0 35 | 928 | 1030 |
| 3 | 2 | 1 | 0.46 | 843 | 936 |
| 4 | 3 | 2 | 0.55 | 771 | 856 |
| 5 | 1 | 1 | 0.70 | 651 | 723 |
| 6 | 2 | 3 | 0.84 | 530 | 588 |

Le mortier n° 1, c'est-à-dire celui de ciment pur, est employé exclusivement à l'étanchement des sources et des fuites d'eau ; son extrême imperméabilité et sa solidification presque instantanée le rendent très-propre à ces sortes de travaux.

Les mortiers 2, 3 et 4 sont employés pour faire les enduits de fosses, de citernes, de réservoirs, etc., pour lesquels l'adhérence et l'imperméabilité sont les principales conditions à exiger.

Les mortiers 5 et 6 sont ceux dont l'usage est le plus fréquent : on les emploie avec de grands avantages de solidité pour hourder toutes les maçonneries de meulières, de briques, de moellons, etc.; pour faire des rejointoiements de toute nature, des chapes et des enduits de maçonneries neuves ou vieilles; on les emploie également pour la reprise des maçonneries en sous-œuvre et pour la restauration des vieux parements de pierre de taille dégradés par le temps, et en général pour tous les ouvrages couverts ou continuellement exposés aux intempéries de l'atmosphère, auxquelles ils résistent parfaitement.

Les mortiers de ciment dans lesquels les proportions de ciment sont moindres que pour celui n° 6 commencent à être maigres et à perdre graduellement leurs principales qualités, autant sous le rapport de l'adhérence que sous celui de l'imperméabilité.

On obtient également des mortiers très-hydrauliques avec de la chaux grasse à laquelle on ajoute au plus 1/5 de ciment en poudre.

La maison Gariel a déjà exécuté avec le ciment de Vassy, de 1834 à 1857, sur différents points de la France, un grand nombre d'ouvrages importants. Par sa persistance et son esprit de suite, par ses soins constants et soutenus employés à former des ouvriers et chefs d'atelier habiles, par ses essais multipliés et coûteux, elle a doté son pays d'une industrie toute nouvelle et donné à l'État le moyen de conserver, sans en altérer la forme primitive, un grand nombre de constructions hydrauliques ou monumentales dont la ruine faisait de rapides progrès, et dont la restauration par les moyens ordinaires eût été impossible à moins d'y employer des sommes énormes.

Les ouvrages les plus remarquables parmi ceux qu'a exécutés la maisont Gariel son indiqués dans le tableau suivant.

| DÉSIGNATION DES OUVRAGES. | DATES de l'exécution. |
|---|---|
| *Restauration d'anciennes constructions, rejointoiements, enduits, reprises de parements, etc.* | |
| Fontaines monumentales de Paris. | De 1840 à 1848 |
| Pont Royal. à Paris. | 1843 à 1844 |
| Pont Marie. à Paris. | 1847 à 1848 |
| Pont de la Tournelle. à Paris. | 1845 à 1846 |
| Pont de Charleville (Ardennes). | 1844 |
| Pont de Belle-Fontaine, près Juvisy (Seine-et-Oise). | 1843 à 1844 |
| Pont de Decise, sur la Loire | 1846 à 1847 |
| Pont de Montrichard (Indre-et-Loire). | 1847 |
| Pont de Sanitas, à Tours. | 1850 |
| Pont de Lavaur (Tarn). | 1850 |
| Pont de Souillac (Lot). | 1853 |
| Pont de Poissy (Seine-et-Oise). | 1851 à 1853 |
| Travaux d'art du canal des Ardennes. | 1841 à 1848 |
| Travaux d'art du canal de Bourgogne (Côte-d'Or). | 1846 à 1847 |
| Canal du Nivernais (Nièvre). | 1834 à 1841 |
| Canal du Berry. | » |
| Canal latéral à la Loire. | » |
| Canal du Midi. | » |
| Canal du Rhône au Rhin. | » |
| Fortifications du Havre. | 1846 |
| Façades latérales de l'hôtel du Val-de-Grâce, à Paris | 1846 |
| Fort de Vincennes. | 1847 |
| Maçonneries à la mer, dans les bassins des ports. du Havre. | 1840 |
| Maçonneries à la mer, dans les bassins des ports. de Honfleur. | 1841 à 1848 |
| Maçonneries à la mer, dans les bassins des ports. de Caen. | *Id.* |
| Maçonneries à la mer, dans les bassins des ports. de Cherbourg. | 1845 à 1848 |
| *Travaux neufs.* | |
| Voûte d'un seul berceau servant de toiture à l'usine de Vassy, formée de 3 rangs de briquettes de 0m.027 posées à plat et recouvertes d'un enduit. Épaisseur totale, 0m.13; longueur, 47m.35; corde, 16m.66; flèche, 5m.40; surface développée, 980 mètres. | 1834 |
| Voûte de l'église des frères de la doctrine chrétienne, à Nantes, de forme ogivale surbaissée et d'un seul berceau, formée de 3 rangs de briques ordinaires posées à plat. Longueur, 32 mètres; portée, 11 mètres; flèche, 4 mètres. | 1844 |
| Voûte de l'église de Saint-Germain-du-Puits (Cher). | 1850 |
| Voûte de l'église de Bagnères-de-Luchon (Haute-Garonne). | 1851 |
| Voûte de la grande salle de l'hôtel de ville de Clermont (Puy-de-Dôme), construite en lave volcanique. Longueur, 25m.80; portée, 10m.40; flèche, 2 mètres; épaisseur à la clef, 0m.42. | 1836 |
| Voûte de l'église de Sauvigny, près Avallon (Yonne), formée de 2 rangs de briquettes de Lisle et recouverte d'une chappe. Épaisseur totale, 0m.10; corde, 8 mètres; flèche, 4 mètres; longueur de la nef, 26 mètres. | 1837 |
| Voûtes, formant planchers, des 3 étages du bâtiment des archives départementales de la ville de Lille (Nord): formées d'un rang de briques ordinaires posées de champ, soit 0m.11 d'épaisseur. Flèche, environ 1/10 de la corde. Elles présentent une surface totale de plus de 3000 mètres carrés. | 1842 |
| Voûtes en voussoirs moulés du bassin couvert de la prise d'eau du canal de l'Ourcq, à la Villette, pour la distribution des eaux dans Paris; ces voûtes, supportées par des piliers de 0m.40 | |

| DÉSIGNATION DES OUVRAGES. | DATES de l'exécution. |
|---|---|
| d'épaisseur, recouvrent une surface de 650 mètres; elles ont 4 mètres de corde et 0m.35 de flèche. | 1844 |
| Voûtes des canaux de chasse du bassin de la Floride, au Havre, sous les fortifications et sous le quai, construites en briques et ciment. Longueur, 50 mètres; corde, 10 mètres; flèche, 2 mètres; épaisseurs à la clef, 0m.54 et 0m.76. | 1847 |
| Voûtes des réservoirs des fontaines d'Avallon, d'Auxerre, de Béziers, de Castelnaudary et de Mers-el-Kébir (Afrique). | 1851 à 1853 |
| Construction totale, en briques et ciment, du grand aqueduc de chasse du port de Honfleur. | 1842 à 1848 |
| Tablettes de couronnement des murs d'escarpe des fortifications du Havre, simulant la pierre de taille, sur une longueur de 1000 mètres, exécutées en briques hourdées en ciment et recouvertes d'un enduit | 1847 |
| Établissement d'une conduite libre de 5 kilomètres de longueur pour l'alimentation des fontaines de la ville d'Avallon (Yonne), avec réservoirs et bâche de prise d'eau. La conduite est formée de deux fortes pièces moulées en ciment de Vassy et fragments de moellons, l'une formant la rigole ou caniveau, l'autre une couverte en berceau. Le caniveau est posé à sec sur le sol, qui est très-ferme, et les pièces qui le composent sont jointes et soudées bout à bout avec du ciment de Vassy. Les pièces de la couverte sont posées à joints croisés et soudés de la même manière. La section du vide intérieur est de 0m.08. La conduite traverse la rivière du Cousin sur un arceau, construit en moellons bruts de granit hourdés en mortier de ciment de Vassy, dont la corde est 31 mètres; la flèche, 3m.10; la largeur, 1m.50, et l'épaisseur à la clef, 1 mètre. | 1847 |
| Des conduites ou caniveaux du même genre ont été construits dans les forts détachés de Charenton, Nogent, Noisy, Vanves (près Paris), pour l'écoulement des eaux pluviales dans les citernes. | 1844 à 1847 |
| Des conduites libres du même genre pour l'alimentation des fontaines des villes d'Auxerre et de Castelnaudary. | 1851 à 1853 |
| Reconstruction du pont aux Doubles, sur la Seine, près l'Hôtel-Dieu, à Paris, en une seule arche de 31 mètres de corde, 3m.10 de flèche, 1m.30 d'épaisseur à la clef, et 16 mètres d'une tête à l'autre, en ciment de Vassy et moellon de meulière brute, le tout recouvert d'un enduit de même mortier, simulant un appareil de pierre de taille avec joints et refends. Ce pont, le premier de ce genre, a été construit sur le modèle d'un arceau de mêmes dimensions, établi par les soins et aux frais de M. Gariel. | 1847 |
| Arche marinière du pont de Villeneuve-sur-Yonne. La voûte est en anse de panier de 34 mètres d'ouverture et 7m.82 de flèche; à l'exception des têtes, qui sont en pierre de taille, elle est en moellons bruts de grès, avec mortier de ciment. L'épaisseur à la clef est de 1m.12. | 1851 |
| Reconstruction du Petit-Pont, à Paris (635). | 1853 |
| Reconstruction du pont Notre-Dame, à Paris (635). | 1853 |
| Voûtes du viaduc de Bercy. | 1853 |
| Passerelle du Cousin, à Avallon (Yonne). Voûte de 30 mètres d'ouverture, 3 mètres de flèche et 1 mètre d'épaisseur, en matériaux granitiques bruts et mortier de ciment. | 1847 |
| Pont d'Arcy sur Cure. Deux voûtes en arc de cercle de 20 mètres d'ouverture, 2m.50 de flèche et 1 mètre d'épaisseur. Les têtes seules sont en pierre de taille. Le remplissage de la douelle est en petits matériaux et ciment de Vassy. Le parement est enduit en mortier de ciment. | 1848 |

| DÉSIGNATION DES OUVRAGES. | DATES de l'exécution. |
|---|---|
| Reconstruction du pont d'Austerlitz, sur la Seine, à Paris (636). . | 1854 |
| Pont de l'Alma, sur la Seine, à Paris. Les maçonneries ont été exécutées avec une rapidité remarquable; en moins de cinq semaines, les piles et les voûtes ont été construites et la chaussée livrée à la circulation (636). . . . . | 1855 |
| Pont des Invalides, à Paris, sur l'emplacement de l'ancien pont suspendu. Les travaux de démolition, commencés en octobre 1854, ont été terminés en mai 1855, malgré les hautes eaux et le froid très-long de l'hiver (636). . . . . | 1855 |
| Pont de Pont-de-l'Arche, sur la Seine (Eure). Construction en maçonnerie avec ciment, de 4 arches marinières de 30 mètres d'ouverture, en remplacement de 10 anciennes arches. . . . . | » |
| Pont-canal sur la rivière d'Orb, à Béziers. Canal du Midi. Bel ouvrage composé de 9 arches en maçonnerie de pierre de taille et petits matériaux avec mortier de ciment. Le revêtement de la bâche et de la cunette est en ciment. . . . . | 1855 |
| Viaduc sur la rivière de l'Aude, chemin de fer du Midi, composé de 5 arches de 16 mètres d'ouverture surbaissées au 1/10. Les voûtes, sauf les têtes qui sont en pierre de taille, sont faites en petits matériaux et mortier de ciment. . . . . | » |
| Ponts fixes sur le canal de Berry. Remplacement de divers ponts-levis par des ponts fixes avec voûtes minces en briques et ciment. Ces ponts ont en général 6m.30 de corde, 0m.50 de flèche et 0m.25 d'épaisseur à la clef. . . . . | » |
| Pont de Masnières, sur le canal de Saint-Quentin. Une arche de 8 mètres de corde, 0m.68 de flèche et 0m.45 d'épaisseur, construite en briques et ciment de Vassy. . . . . | » |
| Construction, à Paris, de plus de 6 000 mètres courants d'égouts en pièces moulées de ciment et meulière, de 0m.11 à 0m.20 d'épaisseur, pieds-droits et voûte. . . . . | 1840 à 1848 |
| Deux aqueducs construits en sous-œuvre sous le canal de l'Ourcq, sans interruption de la navigation. Ces aqueducs ont 2 mètres de hauteur sous clef; l'épaisseur des pieds-droits est 0m.30 et celle de la voûte 0m.20. La maçonnerie est entièrement composée de pièces moulées en ciment et fragments de meulière. . . . | 1846 à 1848 |
| *Enduits en ciment de Vassy.* | |
| Appliqués aux parements des cuves de gazomètres des compagnies française, parisienne, anglaise, pour des hauteurs d'eau de 8 à 12 mètres. . . . . | » |
| Aux citernes et fosses d'aisances des forts de Charenton, Nogent, Noisy, Rosny, Romainville, Aubervilliers et Bicêtre (près Paris). | 1844 à 1847 |
| Aux réservoirs des eaux de la ville de Paris. . . . . | 1841 à 1846 |
| A ceux des villes d'Avallon, Auxerre, Nevers et Castelnaudary. . . | 1853 |
| Sur les radiers de plus de 15000 mètres d'égouts dans Paris. . . . | 1840 à 1848 |
| Sur le radier du grand aqueduc latéral au bassin neuf du port de Caen. . . . . | 1845 |
| Sur le radier du barrage éclusé de la Monnaie, à Paris. . . . . | 1853 |
| Sur les réservoirs d'eau en construction à Passy (6e partie). . . . . | 1857 |

**341.** *Sables, arènes et mortiers.* Les sables employés à la fabrication des mortiers doivent être non terreux et entièrement dépourvus de ma-

tières animales, lesquelles formeraient avec la chaux un savon soluble qui retarderait la solidification des mortiers. Ils doivent être rudes au toucher, et crier dans les mains lorsqu'on les prend.

On reconnaît si les sables sont bien propres en les remuant dans de l'eau ; si celle-ci reste limpide, c'est que le sable est pur et très-bon ; si au contraire elle devient bourbeuse, c'est que le sable est terreux.

Généralement on préfère les sables de rivières à ceux de carrières ; on est plus sûr d'y rencontrer toutes les qualités des bons sables.

On distingue plusieurs sortes de sables employées à la fabrication des mortiers :

1° Le sable calcaire, qui est formé de particules calcaires mélangées de grains de quartz ;
2° Le sable quartzeux, qui ne contient que des particules de quartz ;
3° Le sable micacé, qui est formé de débris de granit contenant de la silice et de l'alumine ;
4° La pouzzolane (531) ;
5° Les arènes, qui sont composées de sable quartzeux à grains inégaux, entremêlé d'argile brune ou jaune orangé, en proportion de 1/4 aux 3/4 du volume total. Les arènes occupent toujours les sommets arrondis de certaines collines ou mamelons d'une faible élévation, dont elles forment quelquefois la masse principale. Comparées aux sables argileux ou limoneux, ce qui caractérise les arènes, c'est une certaine propriété pouzzolanique indépendante de toute cuisson, et qui réside, d'après M. Vicat, dans la partie argileuse seule. Une des meilleures arènes connues s'extrait dans les environs de Saint-Astier (Dordogne) ; la composition de sa gangue argileuse est :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Quartz ou sable. . . . . | 4,13 | Peroxyde de fer. . . . . | 12,00 |
| Silice. . . . . | 38,54 | Carbonate de chaux. . . . . | 8,00 |
| Alumine. . . . . | 20,00 | Eau. . . . . | 17,00 |

Quoique, à l'exception des arènes, ces différentes sortes de sables n'exercent à froid aucune action chimique sur la chaux, leur influence sur la dureté des mortiers est sensible, mais non au même degré pour toutes les espèces de chaux.

Les molécules de chaux grasse ayant entre elles plus de cohésion qu'elles n'ont d'adhérence avec le sable, il en résulte que le sable qu'on ajoute à cette chaux devrait diminuer la dureté que seule elle est susceptible d'acquérir ; mais comme d'un autre côté le sable facilite la pénétration de l'acide carbonique, et par suite le durcissement du mortier, tout en diminuant considérablement la quantité de chaux employée, il en résulte que son concours est très-avantageux.

Les arènes, et même l'argile crue, mêlées à la chaux grasse dans les proportions d'une partie de chaux pour quatre parties d'arènes ou d'argile, donnent une pâte légèrement hydraulique ; ainsi, en peu de jours, le mélange acquiert la consistance d'une pâte ferme insoluble, mais qui ne durcit pas davantage. On ne peut attribuer la qualité hydraulique de la pâte qu'à l'action que la silice de l'argile exerce sur la chaux, et le peu de dureté qu'elle acquiert qu'à ce que l'alumine n'ayant pas

été torréfiée et durcie, elle empêche la masse de prendre toute la dureté que devrait lui communiquer le silicate.

Dans les pays volcaniques, on trouve, outre les sables précédents, une pouzzolane naturelle qui jouit d'une grande énergie. De même que les ciments hydrauliques, elle est un produit du feu. Sa composition comprend les mêmes éléments que la pouzzolane artificielle (538), et quoiqu'elle ait été soumise à une température de beaucoup supérieure au premier degré de cuisson de la brique, lequel est le plus favorable aux pouzzolanes artificielles, elle n'en jouit pas moins du même degré d'énergie. On ne peut attribuer cette différence de se comporter qu'à la décomposition qui s'est opérée depuis longues années, et qui a ramené les pouzzolanes naturelles à l'état des pouzzolanes artificielles les plus cuites.

Dans quelques localités, dans le département de l'Aisne, par exemple, on trouve des grès noirâtres, très-friables et d'un aspect terreux, qui jouissent, avec la chaux, des propriétés de la pouzzolane.

Voici, d'après les expériences de M. Vicat, l'ordre dans lequel on doit classer les sables éminemment siliceux, quant à leur convenance pour différentes chaux qui doivent être exposées à l'air.

*Pour les chaux éminemment hydrauliques :* 1er le sable fin ; 2e le sable à grains inégaux, provenant du mélange, soit du gros sable avec le fin, soit de celui-ci avec le gravier ; 3e le gros sable.

*Pour les chaux communes grasses et très-grasses :* 1er le gros sable ; 2e les sables mêlés ; 3e le sable fin.

Les chaux qui ont fourni ces résultats avaient été éteintes par immersion (535) ; mais il est probable qu'on y arriverait également par les autres modes d'extinction.

Il n'y a que des expériences directes qui peuvent prescrire les proportions de sable et de chaux qui doivent entrer dans un mortier ; elles varient de 1,5 à 3 parties de sable pour une partie de chaux. Jamais le volume de chaux ne doit être moindre que celui des vides que laissent entre eux les grains de sable ; le volume du mortier est alors à peu près égal à celui du sable, excepté cependant dans le cas où les molécules de chaux seraient assez volumineuses pour s'interposer entre les grains de sable et en empêcher le contact.

Le volume des vides laissés entre les grains de sable se détermine en remplissant de ce sable, préalablement desséché, une mesure de capacité déterminée, et à verser dessus une quantité d'eau suffisante pour qu'elle effleure la surface du sable ; le volume d'eau versé est égal à celui des vides.

En opérant ainsi, on trouve que pour les sables de rivières le volume d'eau employé varie généralement de 31 à 34 pour 100 de sable, vide compris.

D'après M. Raucourt (*Traité de l'art de faire de bons mortiers*), pour les débris de pierres ou cailloux de $0^m,027$ à 0,04 de diamètre, tels que ceux que l'on mêle au mortier pour la fabrication du béton, il faut, pour un volume de pierre, un demi-volume d'eau et plus, à quelques variations près; pour des sables ou graviers de $0^m,011$ à $0^m,014$ de diamètre, il faut un demi-volume d'eau; pour des sables gros de $0^m,002$ à $0^m,0045$ de diamètre, cinq douzièmes de volume; pour des sables moyens de $0^m,001$ de diamètre, deux cinquièmes de volume; pour les sables fins de $0^m,00023$ de diamètre, un tiers de volume, et pour les sablons et les terres, deux septièmes de volume.

*Proportions pour les sables mêlés*, d'après le même auteur.

| COMPOSITION A PRÉFÉRER. | | | VOLUME de sable. | VOLUME de chaux ou ciment. | OBSERVATIONS. |
|---|---|---|---|---|---|
| Béton ou mortier mêlé de cailloux. | Cailloux. . . . . | 20 | 27 | 6 + (*) | (*) Plus une addition de chaux égale à la moitié de l'augmentation du volume du mélange. Avec les sables fins, si le volume du mélange augmente, on ajoute un volume de chaux égal à celui de l'augmentation. |
| | Gros sable. . 1 | | | | |
| | Sable moyen. 2 | 7 | | | |
| | Sable fin. . . 4 | | | | |
| Mortier de gravier. | Gravier. . . . 20 | | 26 | 6 + (*) | |
| | Sable moyen. 2 | . . . | | | |
| | Sable fin. . . 4 | | | | |
| Mortier de gros sable. | Gros sable. . 20 | | 25 | 7 | |
| | Sable fin. . . 5 | . . . | | | |
| Mortier de sable moyen. | Sable moyen . 20 | | 25 | 7 | |
| | Sable fin. . . 5 | . . . | | | |

Il n'y a non plus que des expériences directes qui peuvent donner les proportions de chaux et de sable, ciment ou pouzzolane qui doivent entrer dans la composition pour obtenir le degré d'hydraulicité ou d'énergie voulue.

Pour des massifs de maçonnerie qui ne doivent être exposés à une action destructive ou à une charge considérable qu'à une époque éloignée, on peut employer un mortier non très-hydraulique; on l'obtient avec de la chaux hydraulique faible et du sable, ou avec de la chaux énergique mélangée avec de la chaux grasse et du sable, ou encore avec de la chaux grasse et du ciment ordinaire. Si au contraire les mortiers peuvent être soumis à des chances de dégradation presque au moment de leur emploi, ils doivent être très-énergiques, et alors ils se font avec de la chaux énergique et du sable, ou avec de la chaux grasse ou faiblement hydraulique et du ciment hydraulique. Dans tous les cas, il est possible de proportionner l'énergie du mortier pour satisfaire aux conditions exigées.

M. Laroque, constructeur attaché à l'exploitation des ciments de Vassy (540), nous communique, comme fournissant de bons mortiers, les proportions du tableau suivant, données pour un mètre cube de mortier.

| CHAUX. | VOLUME | | | | OBSERVATIONS. |
|---|---|---|---|---|---|
| | de chaux. | de sable. | de ciment de tuileaux. | de pouzzolane. | |
| | éteinte par fusion. | de rivière. | | | |
| | m. cu. | m. cu. | m. cu. | m. cu. | |
| Grasse (non hydraulique). . . | 0.370 | 0.950 | » | » | Murs de clôture, fondation de bâtiments. |
| *Id.* (un peu hydraulique).. | 0.340 | » | 0.820 | » | Pavage des cours. |
| *Id.* *id.* . . . . . | 0.250 | 0.940 | » | 0.200 | Réservoirs, etc. |
| Hydraulique (très-énergique). | 0.360 | 1.000 | » | 0.040 | Travaux dans l'eau. |
| *Id.* (énergie ordin.).. | 0.333 | 1.020 | » | » | Service des eaux et égouts de la ville de Paris, pour les constructions hydrauliques (*). |
| *Id.* *id.* . . . . | 0.370 | 0.950 | » | » | Service de la navigation et des ponts de Paris. |
| | | de plaine. | | | |
| *Id.* *id.* . . . . | 0.380 | 1.020 | » | » | Maçonnerie du fort de Charenton. |
| | par immersion. | | | | |
| *Id.* *id.* . . . . | 0.440 | 1.000 | » | » | Pour enduit, *id.* |
| *Id.* (très-maigre). . | 0.400 | 1.000 | » | » | Les $0^{mc}.100$ de chaux sont amenés au volume de lait de chaux de $0^{m}.340$ (**). |

(*) Les maçonneries des réservoirs recevant les eaux du puits de Grenelle, situés place de l'Estrapade, sont hourdées avec ce mortier, ainsi que toutes celles faites pour les travaux des eaux et égouts de la ville de Paris.

(**) Ce mortier est employé avec avantage, sur une épaisseur de $0^{m},30$ à $0^{m},40$, dans le fond d'une fondation sur un sol douteux. Le réservoir d'eau situé rue des Amandiers repose sur une couche de $0^{m}.50$ de ce mortier, qui finit par prendre beaucoup de consistance.

Pour les mortiers en chaux grasse, M. Vicat conseille l'emploi des gros sables, à grains non arrondis, c'est-à-dire rudes au toucher. Ces mortiers se composent, sans que leur cohésion varie sensiblement, de 190 à 240 de sable en volume, pour 100 de chaux en pâte. L'extinction sèche de la chaux est préférable à l'extinction ordinaire; la force du mortier est de près des 2/3 plus forte, mais il entre plus de chaux, quoique le volume de la pâte soit le même. Les mortiers de chaux grasse gagnent à être corroyés à plusieurs reprises; c'est ce qui justifie le procédé lyonnais, qui consiste à en fabriquer d'avance de grands tas; d'où l'on tire la consommation journalière, que l'on rend souple au moment de l'emploi par une addition d'eau.

Pour les mortiers de chaux hydraulique, M. Vicat conseille un

broyage avec le pilon, ou le rabot, ou le manége, et avec le moins d'eau possible. En moyenne, on emploie 1,80 de sable pour 100 de chaux, et un léger écart de ces proportions, en plus ou en moins, est sans inconvénient sensible. Pour les mortiers destinés à l'immersion, il faut assurer la première liaison par un surcroît de 1/6 à 1/5 de chaux en sus de la proportion moyenne, et donner au mortier la plus grande consistance possible, ce que l'on n'obtient qu'à l'aide du pilon. Pour des conduits ou des crépissages destinés à braver les intempéries, on force au contraire la dose de sable, sans s'étonner de la maigreur du mélange; la cohésion y perd un peu, mais la résistance à la gelée y gagne considérablement. Pour un mortier hydraulique, la nature du sable a peu d'influence, pourvu que le grain soit palpable, net, dur et privé de limon ; il ne doit être ni trop fin ni trop gros, un peu moins de 1 millimètre est une grosseur moyenne convenable. Les sables de la Seine dragués à Paris sont beaucoup trop gros ; ceux de la Garonne, de la Dordogne, de l'Allier et de la Loire sont satisfaisants. La cohésion finale d'un mortier hydraulique en sable moyen étant représentée par 100; elle descendra à 70 pour un très-gros sable comme celui de la Seine, et à 50 pour du menu gravier. Les chaux hydrauliques gagnent à être éteintes par le procédé ordinaire (2°,535) ; la cohésion augmente peu pour un mortier qui reste exposé à l'air, mais elle s'accroît de 1/5 pour le cas d'une immersion constante. Toutes les fois que cela est possible, l'on doit donc préférer l'extinction à grande eau à l'extinction en poudre. Le mortier hydraulique doit être gâché à couvert quand la saison est pluvieuse, ce qui suppose le sable mouillé; la chaux employée se compose alors de 1/2 ou 1/3 de chaux en pâte et le reste en chaux éteinte en poudre, afin d'absorber l'eau du sable; sans cette précaution on n'obtiendrait qu'un mortier délavé. Par un temps sec et chaud, il devient, au contraire, quelquefois indispensable d'ajouter de l'eau, mais on ne doit le faire qu'avec réserve, car il en faut très-peu pour noyer le mortier, qui ne doit jamais atteindre l'état de bouillie, même épaisse; il doit bien tenir sur la truelle, sans trop s'affaisser. Par l'emploi d'un mortier noyé ou introduit entre les pierres sous forme de coulis, il y a 50 ou 30 pour 100 à perdre sur la bonté d'une maçonnerie, selon que la maçonnerie est exposée à l'air, ou constamment immergée. Si les matériaux sont absorbants, comme la brique, et d'ailleurs très-secs, on doit les arroser de temps à autre jusqu'au moment de leur emploi; ainsi le mortier doit être sec et les matériaux mouillés.

**342.** *Fabrication du mortier.* Les proportions de chaux et de sable étant déterminées, on fait le dosage à l'aide de brouettes d'une capacité déterminée de 5 à 8 centièmes de mètre cube. On procède alors à la manipulation, qui se fait à bras d'hommes dans les petits chantiers et mécaniquement pour les grands travaux.

*Manipulation à bras.* Sur une aire faite en planches, afin que la terre

ne se mélange pas au mortier, on étale environ 3 brouettes de sable en forme de bassin circulaire, dans lequel on verse la quantité convenable de chaux en pâte, quantité qui forme ordinairement une brouettée. On procède alors au mélange du sable et de la chaux à l'aide d'un rabot que l'on pousse en le tenant à plat pour écraser les masses, et que l'on tire en le mettant sur le tranchant pour soulever la matière et tirer toujours un peu de sable du bassin sur la partie ramollie. Un manœuvre relève la matière en tas au fur et à mesure que l'autre l'étale avec le rabot.

Il arrive quelquefois que la chaux, surtout la chaux hydraulique, est trop raffermie et le sable trop sec pour permettre un mélange facile. Dans ce cas, on la ramollit avec des pilons avant de se servir des rabots, ou on jette dessus une certaine quantité d'eau. Le premier moyen est préférable; mais comme il est dispendieux, on emploie souvent le second, dont on peut atténuer les inconvénients en substituant à l'eau un lait de chaux.

*Manipulation mécanique.* Elle se faisait le plus souvent à l'aide d'un manége à trois roues, mû par deux chevaux, et dont nous avons donné les principales dimensions au sujet de la chaux hydraulique artificielle (533).

Pour se servir d'une telle machine, on place dans toute l'étendue de l'auget la chaux nécessaire à une bassinée; on fait faire quelques tours aux roues, afin de la bien ramollir, et alors, sans arrêter le manége, on jette à la pelle, au fur et à mesure que le mélange s'opère, la quantité convenable de sable. Pendant que le mélange se termine, on accumule autour de l'auget la chaux et le sable pour la bassinée suivante. Un râcloir en fer, qui épouse la forme de l'auget, ramène au fond de cet auget la matière que les roues font monter contre ses parois. Le râcloir est fixé à une tige horizontale et supporté par deux roues de $0^{m},30$ de diamètre qui marche sur deux rails en fer fixés à $0^{m},10$ du bord de l'auget. Une vanne en bois convenablement fixée au manége fait tomber le mortier dans un trou disposé pour le recevoir, en le faisant passer par une soupape que l'on ouvre dans le fond de l'auget.

On peut faire $0^{mc},30$ de mortier par bassinée, dont le broyage est terminé en 22 minutes. Dans un travail journalier de 10 heures, on peut donc fabriquer $24^{mc},60$ de mortier par manége.

Aujourd'hui la fabrication mécanique du mortier se fait presque exclusivement à l'aide de tonneaux en bois de chêne d'environ $1^{m},30$ de hauteur et $1^{m},10$ de diamètre, légèrement évasés par le haut, fermés par le bas, et portant latéralement, à leur partie inférieure, une ouverture qui se ferme à volonté avec une porte à coulisse et qui sert à l'écoulement du mortier. Aux parois intérieures du tonneau, à différentes hauteurs, sont fixés des croisillons en fonte tranchants armés de dents en fer. Un arbre vertical placé dans l'axe du tonneau porte trois croisillons armés de dents qui se croisent avec les

premières. Ces tonneaux, imaginés par M. Bernard, inspecteur des ponts et chaussées, ont été employés avec avantage au port de Toulon.

M. Roger, architecte, a apporté deux modifications importantes aux tonneaux de M. Bernard : la première consiste en ce que le mortier s'écoule non-seulement par une porte latérale, mais aussi par des ouvertures pratiquées dans le fond du tonneau, ce qui facilite la vidange; la seconde, en ce que l'arbre vertical porte des disques en fonte qui écrasent le mortier contre le fond du tonneau.

Au simple mélange des tonneaux de M. Bernard, ceux de M. Roger ajoutent le broiement; aussi ces derniers fournissent-ils des mortiers supérieurs, surtout lorsque le sable est argileux.

M. Roger construit des tonneaux de toutes grandeurs : il y en a qui sont manœuvrés par un seul homme, d'autres par deux ou par quatre; il y en a qui le sont par un cheval et même par deux, et dans ce moment, aux bassins que l'on établit à Passy, une locomobile, de la force nominale de 4 chevaux, manœuvre 2 tonneaux, qui fabriquent facilement, par jour, chacun 30 mètres cubes d'un mortier très-bien mélangé.

**343.** *Prix de revient de la fabrication du mortier.*

1° *Au rabot*, on peut établir le prix de revient du mètre cube d'après les données suivantes :

L'établissement du plancher sur le sol, et l'intérêt du prix et l'entretien des brouettes de mesure, des seaux, etc., peuvent être estimés à 20 fr. par année.

Un rabot coûte 5 fr.; il peut servir à fabriquer 300 mètres cubes de mortier dans une année, et l'intérêt du prix d'achat et l'entretien peuvent être évalués à 5 fr. pour une année.

Un chef d'atelier peut surveiller quatre équipages composés chacun de cinq garçons, y compris les manœuvres qui approchent les matières.

Un chef d'atelier est supposé payé 6 fr. par jour et les garçons 2 fr. 50 c.

Sous-détail de la fabrication d'un mètre cube de mortier :

| | fr. |
|---|---|
| $9^h,00$ d'ouvrier à 2 fr. 50 c. pour 10 heures. . . . . | 2,25 |
| $0^h,25$ de chef d'atelier à 6 fr. pour 10 heures. . . . | 0,15 |
| Frais d'outils. . . . . | 0,13 |
| Total. . . . . | 2,53 |

2° *Fabrication avec le manége.* L'établissement du manége revient à environ 440 fr. Pour les établissements successifs du même manége en divers lieux, on peut compter sur 170 fr. de dépense chaque fois.

Supposant que le manége n'ait servi qu'une campagne dans un seul emplacement, l'intérêt du prix d'établissement sera de $0^f,44$ par jour de travail, en supposant deux cents jours de travail.

Comptant sur 45 fr. pour l'entretien annuel des brouettes, seaux, etc., cela fera par jour de travail $0^f,225$.

Pour le service de la machine, il faut, par journée de travail :

| | fr. |
|---|---|
| 2 chevaux à 5 fr. | 10,00 |
| 1 conducteur à 3 fr. | 3,00 |
| 6 garçons à 2 fr. 50 c. | 15,00 |
| 1 heure de chef d'atelier à 6 fr. | 0,60 |
| Entretien du manége. | 1,20 |
| Total. | 29,80 |

Admettant que le manége dure huit ans, après lesquels la valeur intrinsèque des matériaux soit de 100 fr., la perte totale sur le manége sera de 340 fr., ce qui fait $42^{f},50$ par an, ou $0^{f},21$ par journée de travail.

La dépense journalière occasionnée par le manége sera donc de $0,11 + 0,23 + 29,80 + 0,21 = 30^{f},35$.

Le prix de chacun des $24^{mc},60$ de mortier fabriqués par journée de travail sera donc de $1^{f},24$.

3° *Fabrication avec un tonneau Roger.* Un de ces tonneaux coûte 1005 fr., 8 hommes en font le service et fabriquent 25 mètres cubes de mortier en 10 heures de travail, ou 5000 mètres cubes en 200 jours de travail dans l'année.

L'entretien annuel ne dépasse pas 200 fr.

Admettant que le tonneau dure dix ans, après lesquels les débris valent 100 fr., la perte annuelle sera de $90^{f},50$.

On peut, comme dans le cas précédent, compter 45 fr. pour l'entretien annuel des brouettes, seaux, etc.

Les trois dépenses annuelles précédentes, plus l'intérêt, font un total de $385^{f},75$; ce qui fait, pour les frais d'outils, par mètre cube de mortier, $0^{f},08$.

*Sous-détail par mètre cube de mortier :*

1° Avec des hommes :

| | fr. |
|---|---|
| $3^{h},2$ d'ouvrier à 2 fr. 50 c. | 0,80 |
| $0^{h},2$ de chef d'atelier à 6 fr. | 0,12 |
| Frais d'outils. | 0,08 |
| Total | 1,00 |

2° Avec un cheval :

| | fr. |
|---|---|
| $0^{h},40$ de cheval et de conducteur à 8 fr. | 0,32 |
| $1^{h},6$ de garçons à 2 fr. 50 c. | 0,40 |
| $0^{h},20$ de chef d'atelier à 6 fr. | 0,12 |
| Frais d'outils. | 0,08 |
| Total. | 0,92 |

3° Fabrication aux réservoirs de Passy avec deux tonneaux manœuvrés par une locomobile. M. Gariel, entrepreneur.

Établissement :

| | fr. |
|---|---|
| Locomobile de la force nominale de 4 chevaux. . . . . | 4 800 |
| Transmission complète et montage. . . . . | 1 000 |
| Charpente et ferrements. . . . . | 150 |
| Les deux tonneaux. . . . . | 1 000 |
| Total. . . . . | 6 950 |

Dépense journalière :

| | fr. |
|---|---|
| 100 kilogrammes de houille. . . . . | 4,50 |
| Chauffeur.. . . . . | 4,00 |
| Huile, étoupes, chiffons, etc. . . . . | 1,50 |
| Intérêt, entretien et amortissement. . . . . | 10,00 |
| 2 hommes pour mesurer et approcher le sable; 2 hommes pour sortir la chaux des bassins et l'approcher ; 2 hommes pour mélanger les matières et charger les broyeurs ; en tout 6 hommes à 3 fr. par jour.. . . . . | 18,00 |
| Faux frais. . . . . | 2,00 |
| Total. . . . . | 40,00 |
| Prix de revient de la fabrication du mètre cube de mortier en supposant que l'on ne fabrique que 50 mètres cubes en 10 heures de travail (542). . . . . | 0,80 |

**544.** *L'eau employée pour l'extinction des chaux* (535), *et en général pour la fabrication des mortiers*, doit, autant que possible, être très-pure. On ne doit faire usage des eaux de mer et de toutes celles qui sont saumâtres qu'autant que l'on est assuré par l'expérience qu'elles fournissent de bons mortiers.

L'emploi de l'eau de mer est presque toujours défendu pour la fabrication des mortiers; mais ce principe ne doit pas cependant être général. Le mortier fabriqué avec cette eau a une dessiccation très-lente, et il produit pendant assez longtemps, à la surface des maçonneries, des efflorescences salines qui doivent faire supprimer son emploi dans la construction des maisons d'habitation, mais qui sont sans importance pour des murs de quais et des constructions analogues.

**545.** *Béton.* C'est un mélange de mortier hydraulique et de pierres cassées de 3 à 4 centimètres de côté, dans des proportions qui dépendent des vides existant entre les pierres, et de la dureté et de l'énergie de prise dont on a besoin pour le travail à exécuter. On dit que le béton est *gras* ou *maigre*, selon que la proportion de mortier est grande ou faible.

Le volume des vides existant entre les pierres se détermine comme pour le sable (541), en versant sur les pierres sèches, placées dans un vase de capacité connue, autant d'eau qu'il est possible; le volume d'eau versé est égal à celui des vides.

De plusieurs expériences faites de cette manière, il résulte que dans un mètre cube apparent de cailloux mêlés, de diverses grosseurs mais ne dépassant pas $0^{m},05$ dans aucun sens, semblables à ceux dont on se sert à Paris, le vide est de $0^{mc},38$, et que pour les pierres cassées et les cailloux de grosseur à peu près uniforme et ne dépassant pas $0^{m},05$, il est de $0^{mc},46$.

Pour obtenir un béton dont les vides des cailloux soient bien remplis, le volume du mortier doit dépasser celui des vides; il doit être au moins de 1/4 plus grand : ainsi, selon que le volume des vides sera de $0^{mc},38$ ou de $0^{mc},46$, celui du mortier employé devra être au moins de $0^{mc},48$ ou de $0^{mc},58$ pour obtenir un béton plein propre à la construction des massifs de fondations qui doivent résister à la pression de l'eau.

Lorsque le béton n'est pas destiné à résister à la pression de l'eau, quand, par exemple, il est employé à la construction de fondations qui se trouvent au-dessus de la masse d'eau, il n'y a pas nécessité qu'il soit imperméable; il suffit qu'il soit incompressible et qu'il résiste à la rupture, et alors le volume du mortier peut être égal et même quelquefois inférieur à celui des vides des cailloux ou des pierres cassées.

*TABLEAU des proportions de mortier et de cailloux mêlés, de diverses grosseurs, mais inférieures à* $0^{m}.05$, *par mètre cube de quelques bétons.*

| DÉSIGNATION. | MORTIER. | CAILLOUX. | OBSERVATIONS. |
|---|---|---|---|
| | m. cu. | m. cu. | |
| Béton gras. . . . . | 0.55 | 0.77 | Pour radiers, réservoirs, etc., soumis à une pression d'eau considérable. |
| *Id.* ordinaire. . . . | 0.52 | 0.78 | Pour les ouvrages de maçonnerie des eaux et égouts de la ville de Paris. |
| *Id.* *id.* . . . . | 0.48 | 0.84 | Pour les travaux de navigation dans Paris, fondations de piles de ponts, de murs de quais, etc. |
| *Id.* un peu maigre. | 0.45 | 0 90 | Pour fondations d'édifices sur terrains humides et mouvants. |
| *Id.* maigre. . . . . | 0.38 | 1.00 | Massifs, fondations, etc., sur terrains secs et mouvants. |
| *Id.* très-maigre. . . | 0 20 | 1.00 | |

Pour des pierres cassées ou des cailloux de grosseur uniforme, on ajouterait au volume de mortier du tableau précédent l'augmentation de volume des vides.

Le dosage des matières se fait, comme pour le mortier (542), à l'aide de brouettes de 5 à 8 centièmes de mètre cube.

Le béton se fabrique à bras d'hommes à l'aide d'une griffe à trois dents ou avec des machines.

Pour fabriquer le béton avec la griffe, on commence par étaler sur une aire en planches une brouettée de cailloux; dessus on stratifie la quantité proportionnelle de mortier, puis une ou deux brouettées de

cailloux, puis le mortier et une troisième brouettée de cailloux que l'on recouvre de la quantité convenable de mortier. On a soin de commencer ces stratifications par les couches de cailloux, sans quoi le mortier adhérerait à la plate-forme, et le mélange serait difficile.

Cela fait, on retrousse le tas à la pelle, puis, avec des griffes en fer à trois dents, on l'étale de nouveau ; on retrousse la matière, puis on l'étale, et on continue ainsi de suite jusqu'à ce que le mélange soit complet ; ce qui a lieu quand les cailloux sont entièrement couverts de mortier.

Détail du temps employé à la fabrication d'un mètre cube de béton :

| | h. |
|---|---|
| Lavage des cailloux. . . . . | 0,60 |
| Charge, transport et étalage des cailloux et du mortier. . . | 1,70 |
| Mélange. . . . . | 5,00 |
| Total. . . . . | 7,30 |

Sous-détail du prix de fabrication du mètre cube de béton (543) :

| | fr. |
|---|---|
| $7^h,30$ d'ouvriers à 2 fr. 50 c. pour 10 heures. . . . . | 1,82 |
| $0^h,25$ de chef d'atelier à 6 fr. . . . . | 0,15 |
| Frais d'outils. . . . . | 0,13 |
| Total. . . . . | 2,10 |

Quand on a une grande quantité de béton à fabriquer, il convient de faire usage de machines.

La première machine employée est celle dite à coffres. Elle se compose de dix coffres, et sa manœuvre exige de dix à six ouvriers, suivant que l'on veut accélérer plus ou moins le travail.

Les dix coffres étant en fonte et ayant les dimensions indiquées par la fig. 1, pl. III, qui en représente deux tout montés en élévation et en plan, la machine coûte environ 550 fr. de premier établissement.

On peut admettre qu'elle durerait au moins trois ans, et qu'alors elle vaudrait 50 fr. ; de sorte que la perte serait de 500 fr., ce qui fait $166^f,67$ par an.

L'établissement d'une plate-forme à chaque extrémité de la machine, l'intérêt du prix d'achat des brouettes, seaux, etc., et leur entretien peuvent être évalués à 80 fr. par an.

Ajoutant à ces deux sommes 300 fr. par an pour l'entretien et les frais de déplacement de la machine, ainsi que $27^f,50$ pour l'intérêt du prix d'achat, on voit que les frais d'outils s'élèvent par année à $574^f,17$.

Avec 10 hommes pour faire fonctionner la machine, on peut fabriquer moyennement 35 mètres cubes de béton par journée de 10 heures de travail. Supposant que la machine fonctionne 150 jours par année, elle fabriquera donc 5250 mètres cubes de béton.

Aux réservoirs de la rue de la Vieille-Estrapade, le nombre d'heures d'ouvriers employé à la fabrication d'un mètre cube de béton s'est divisé comme il suit :

| | h. |
|---|---|
| Lavage des cailloux. . . . . | 0,60 |
| Dosage et approchage des cailloux et du mortier. . . . . | 2,00 |
| Étendage des cailloux et du mortier, et les placer dans les coffres. . . . . | 0,86 |
| Service de la machine. . . . . | 2,86 |
| Enlèvement du béton. . . . . | 0,60 |
| Total. . . . . | 6,92 |

Sous-détail du prix de fabrication du mètre cube de béton :

| | fr. |
|---|---|
| $6^h,92$ d'ouvrier à 2 fr. 50 pour 10 heures. . . . . | 1,73 |
| $0^h,14$ de chef d'atelier à 6 fr. pour 10 heures. . . . . | 0,08 |
| Frais d'outils, $574^f,17$ pour 5250 mètres cubes de béton. . | 0,11 |
| Total. . . . . | 1,92 |

Au port d'Alger, on a fabriqué le béton avec un *couloir à béton*. C'est une caisse rectangulaire en bois de 1 mètre sur $0^m,80$ de section et de $2^m,50$ de hauteur. Elle porte à la partie inférieure une ouverture latérale de 1 mètre de largeur sur $0^m,60$ de hauteur, par laquelle sort le béton. A la partie supérieure, sur la plus large face de la caisse, se trouve un plan incliné en bois doublé de tôle, sur lequel on place les matières à mélanger, lesquelles, en quittant ce plan, tombent sur un deuxième plan incliné fixé au milieu de la caisse contre la paroi opposée, puis sur un troisième plan dont le bas repose sur le seuil de l'ouverture latérale de la caisse, de manière à y amener la matière mélangée.

Une telle machine, y compris un léger échafaudage ou une rampe pour élever les matières, peut être estimée 150 fr.

En supposant que cet appareil fonctionne 150 jours dans l'année, il pourra fabriquer annuellement 9000 mètres cubes de béton.

Supposant que cette machine a éprouvé à la fin de la campagne une perte de valeur de 100 fr. y compris les réparations, ajoutant à cette somme $7^f,50$ pour l'intérêt du prix d'établissement, plus 100 fr. pour les plates-formes destinées à préparer les matières et à recevoir le béton à la sortie de la machine, pour l'intérêt du prix d'achat des brouettes, seaux, etc., et pour leur entretien, on aura une somme de $207^f,50$ pour les frais d'outils ; ce qui fait $0^f,024$ par mètre cube de béton.

Nombre d'heures d'ouvriers employé à la fabrication d'un mètre cube de béton :

| | h. |
|---|---|
| Lavage des cailloux. . . . . | 0,60 |
| Dosage et approchage des cailloux et du mortier. . . . . | 2,00 |
| Pour jeter et étendre ces matières sur le plan incliné du couloir. . . . . | 0,86 |
| Pour débarrasser le couloir du béton fait. . . . . | 0,60 |
| Total. . . . . | 4,06 |

Sous-détail du prix de fabrication d'un mètre cube de béton :

| | fr. |
|---|---|
| 4h.06 d'ouvriers à 2 fr. 50 pour 10 heures. . . . . | 1,015 |
| 0h,17 de chef d'atelier à 6 fr. pour 10 heures. . . . . | 0,102 |
| Frais d'outils. . . . . | 0,024 |
| Total. . . . . | 1,141 |

**346.** *Mortiers employés à la mer.* Les travaux à la mer qui ont résisté depuis longues années et qui se trouvent dans un bon état de conservation ont été établis avec des mortiers de pouzzolanes naturelles énergiques unies aux chaux hydrauliques. Dans ces derniers temps, et dans des vues d'économie, on a fait usage de mortiers diversement composés de chaux grasses, de pouzzolanes artificielles et de sables; mais un grand nombre de ces mortiers se sont ramollis après un temps plus ou moins long, et il y a lieu de craindre que les autres n'entraînent également la ruine des travaux dans lesquels ils entrent. Quelques combinaisons permettent cependant d'espérer beaucoup; ainsi, à Saint-Malo, M. l'ingénieur Féburier a employé avec succès, depuis plusieurs années, un simple mortier de sable de grève et d'une chaux artificielle de deuxième cuisson d'une grande énergie. A Cherbourg, à Brest et sur d'autres points, on a obtenu, avec un ciment artificiel de première cuisson, composé de craie et d'argile, et connu sous le nom de ciment de Portland, des résultats qui paraissent laisser bien loin en arrière tout ce qu'on pourrait obtenir des pouzzolanes d'Italie et des bords du Rhin.

Les eaux de la Méditerranée paraissent posséder à un moins haut degré les causes de destruction des mortiers que celles de l'Océan et de la Manche : cela est dû sans doute à leur composition, qui paraît être un peu différente, à leur température plus élevée de 4 à 6 degrés, et à leurs courants 4 fois moins rapides sur les côtes.

### MAÇONNERIES.

**347.** Dans les chantiers de maçonnerie on distingue (*Art*, nos 1 à 9).

1° Les *garçons*. Ce sont les ouvriers destinés à la manœuvre des matériaux sur les ateliers; c'est par là que commencent les apprentis maçons;

2° Les *maîtres garçons*. Ce sont des garçons qui ont fait preuve d'intelligence et de zèle, et que les chefs d'ateliers choisissent comme aides pour les remplacer dans diverses circonstances. Quand un maçon passe chef d'atelier, il choisit ordinairement son garçon pour en faire son maître garçon;

3° Les *maçons limosins*. Ce sont les garçons ou maîtres garçons qui se sont mis à faire toutes les maçonneries en moellons, meulières, etc., ainsi que les rejointoiements, les rocaillages, les crépis et les enduits grossiers;

4° Les *maçons à plâtre*. Ce sont ceux qui, dans les localités comme Paris, où on fait un très-grand usage de plâtre, terminent les bâtiments élevés par les maçons limosins. Ils font tous les travaux de plâtrerie désignés plus particulièrement sous le nom de *légers ouvrages*;

5° Le *maître compagnon* ou *chef d'atelier*. C'est l'employé chargé de diriger tous les maçons et garçons d'un même chantier;

6° Le *commis* ou *conducteur de travaux*. C'est l'employé chargé de conseiller plusieurs maîtres compagnons et appareilleurs (552), et d'en surveiller les ateliers;

7° Le *tâcheron*. C'est un ouvrier ou un employé auquel un entrepreneur cède une partie de son entreprise, ordinairement de main-d'œuvre seulement.

548. On donne le nom de *maçonnerie* à un ouvrage quelconque composé de pierres naturelles ou artificielles plus ou moins grosses reliées par du mortier, du plâtre, de la terre, ou simplement posées à sec en liaison les unes avec les autres. Il y a aussi la maçonnerie de *pisé*, qui est faite en terre desséchée sur place.

La maçonnerie de pierre se fait en pierre de taille, en moellons, en briques, etc., posés par assises régulières ou irrégulières.

Dans la maçonnerie de moellons à assises régulières, on distingue celle où les moellons sont posés bruts, ce qui donne la maçonnerie dite *limosinage* (on se contente d'aligner le parement du mur au cordeau, et de faire quelquefois sauter avec le marteau les aspérités qui rendent par trop irrégulières les faces horizontales et la face apparente des moellons), et celle où on a donné préalablement aux moellons une épaisseur régulière dans chaque assise; quand cette dernière maçonnerie est très-soignée, la hauteur est uniforme pour toutes les assises ainsi que la largeur des pierres.

La maçonnerie de moellons à assises irrégulières peut se faire en posant les moellons à la main et de manière à paramenter le mur, elle prend encore alors le nom de *limosinage*; ou sans même prendre cette précaution, ce que l'on fait généralement pour les fondations et pour les doubles murs adossés à un terre-plein, dans ce cas elle prend le nom de *maçonnerie de blocage*. On appelle aussi blocage le remplissage en éclats de pierre que l'on fait à l'intérieur des murs, entre les pierres ou moellons taillés qui forment les parements, et que l'on place à bain de mortier. La maçonnerie de blocage est d'autant meilleure que l'on proportionne mieux les dimensions des pierres à celles des espaces qu'elles doivent remplir, et qu'elles sont mieux enveloppées d'une couche de mortier sur toute leur surface. Dans la maçonnerie de moellons à assises irrégulières, on peut ranger celle formée de pierres cassées jetées sans précaution, pêle-mêle avec le mortier; c'est la *maçonnerie de béton* (545).

549. *Maçonnerie de pisé*. On ne l'emploie que pour les constructions de peu d'importance, telles que les bâtiments ruraux, et seulement dans les localités où la pierre est rare; encore ne doit-on l'établir que sur un socle en pierre s'élevant jusqu'au-dessus du sol.

La terre à briques est la plus convenable pour faire le pisé; on y mélange, en la pétrissant, de la paille ou du foin pour l'empêcher de

se fissurer quand elle se dessèche. La terre sablonneuse, sans liant, est impropre à la confection de cette maçonnerie.

Les murs en pisé se font en posant simplement le mélange de terre et de paille avec une fourche qui sert aussi à dresser les parements du mur, dont la position est déterminée par des cordeaux tendus. Quand cette maçonnerie doit être faite avec plus de soin, on emploie deux planches maintenues à une distance égale à l'épaisseur du mur. Entre ces planches, que l'on place dans les parements du mur, on tasse la terre par couches, à l'aide de battoirs ou de pilons. Quand cette espèce de coffre est remplie, on fait sauter les clavettes qui relient ses parois aux traverses qui en règlent l'écartement, on retire ces traverses et on place le coffre en un autre point du mur. Les trous laissés dans le mur par les traverses du coffre se remplissent avec de la terre. En serrant de plus en plus les clavettes des traverses, à mesure que le mur s'élève, on donne le fruit convenable à cette espèce de maçonnerie; ce fruit est ordinairement de 7 à 8 millimètres par mètre de hauteur pour chaque face. Il est évident que ce genre de maçonnerie ne peut être employé que pour des constructions peu élevées et non chargées. On en fait un fréquent usage pour la construction des murs de clôture, qu'il faut avoir soin de couronner d'un paillasson en chaume faisant office de corniche. On charge ce paillasson, afin de le maintenir en place, à l'aide d'une espèce de chaperon en terre, que l'on renouvelle de temps à autre.

Dans la vallée du Rhône, on construit des maisons à plusieurs étages en pisé. On rend les murs solidaires entre eux au moyen de pièces de bois de faible équarrissage reliées entre elles et posées à plat dans les murs de refend et de face. Quelquefois on construit les angles en moellons; mais alors le tassement inégal des différentes parties des murs est une cause grave de destruction. On augmenterait beaucoup la solidité du pisé en plaçant dans l'intérieur des murs, à des hauteurs différentes, des lattes ou des verges disposées horizontalement dans le sens longitudinal.

Un enduit formé d'une partie de chaux pour 4 d'argile et d'une quantité de bourre suffisante pour en parsemer toute la masse rend convenable le pisé pour résister à l'action destructive de l'air et de la pluie. Cet enduit ne doit être appliqué qu'après la dessiccation des murs. Dans le département du Rhône, on a reconnu que des murs de 18 à 20 pouces d'épaisseur, achevés vers le commencement de mai, peuvent recevoir l enduit à la fin de septembre; que ceux terminés en juillet et même en août peuvent encore être enduits avant l'hiver; mais ceux finis plus tard exigent au moins six mois de dessiccation. Le vernis ne doit pas être appliqué pendant les temps de gelée, et il convient que le temps ne soit ni humide ni pluvieux. Plus le pisé est sec, mieux l'enduit s'y attache.

**350.** *Maçonnerie de pierre de taille.* On donne le nom de *pierre de taille* aux blocs de pierre qu'un seul homme ne peut ni manier ni porter, et que pour employer on dresse au moins sur les faces apparentes ainsi que sur les *lits*.

Les *libages* sont les gros blocs de pierre que l'on emploie bruts ou grossièrement dressées sur les faces pour la fondation des édifices.

Une pierre doit toujours avoir deux faces normales à la direction de l'effort qu'elle supporte et qu'elle transmet; ainsi dans un mur vertical les faces inférieure et supérieure de chaque pierre de taille ou de chaque libage doivent être horizontales. Ces faces prennent le nom de *lits*, et elles doivent être les mêmes que celles qui forment les lits à la carrière, quand les pierres proviennent de roches stratifiées.

La face apparente d'une pierre, c'est-à-dire son *parement*, doit aussi être dressée; il en est de même des faces latérales, que l'on appelle *joints*, et qui sont toujours perpendiculaires au parement et aux *lits*. On donne aussi le nom de joint à l'intervalle de 4 à 10 millimètres qui reste entre deux pierres et qui reçoit le plâtre ou le mortier. Les faces sont dressées avec d'autant plus de soin que la construction doit être mieux finie et plus solide.

Dans une construction on donne le nom d'*assise* à une même rangée horizontale de pierres. La *hauteur d'assise* d'une pierre est la distance entre les lits. Dans une construction solide, cette hauteur doit être la même pour toutes les pierres d'une même assise, et si la construction est soignée, elle est la même pour les différentes assises.

La dimension d'une pierre perpendiculairement à son parement, c'est-à-dire la quantité dont elle pénètre dans l'épaisseur du mur, s'appelle *queue* de la pierre. Pour une même assise, la longueur de queue doit être différente pour deux pierres consécutives, afin de bien relier entre eux tous les matériaux d'une même assise. Une pierre plus longue en parement qu'en queue prend le nom de *carreau*. Le rapport entre la longueur du parement et la hauteur d'assise d'un carreau dépend de la dureté de la pierre : pour une pierre tendre, ce rapport ne dépasse pas 2,5; pour une pierre dure, il va à 3,5. Une pierre qui est au contraire plus longue en queue qu'en parement prend le nom de *boutisse;* sa longueur en parement doit toujours être plus grande que sa hauteur d'assise. Quand une pierre s'étend d'un parement à l'autre du mur, on dit qu'elle fait *parpaing*, et elle-même prend le nom de *parpaing*..

Les joints verticaux d'une assise ne doivent pas correspondre avec ceux des deux assises en contact, leurs plans doivent être éloignés de $0^m,15$ à $0^m,20$ au moins.

Il faut éviter avec soin de placer les joints verticaux ou horizontaux dans les angles rentrants ou saillants que peut former le parement d'un mur ; ainsi une pierre formant l'angle de deux murs doit faire partie de ces deux murs afin de les relier, et s'il y a une retraite horizontale

dans le parement d'un mur, il faut éviter qu'elle corresponde à un lit, afin de ne pas avoir un joint dans une partie où l'eau peut couler ou séjourner.

351. *Bossages et vermiculures.* Comme il arrive quelquefois que les pierres s'*épauffrent* c'est-à-dire s'écornent dans les lits, on a imaginé de prévenir cet inconvénient en refouillant d'avance les lits; c'est ce que l'on appelle faire des *bossages*. Cette opération ne se fait que dans les soubassements, où les pierres sont le plus sujettes aux épauffrures, dans les murs de soutenement, les piles de ponts, les rez-de-chaussée de certains édifices auxquels on veut donner un aspect de solidité. Quelquefois on ne refouille en bossage que les chaînes saillantes placées de part et d'autre des portes, aux angles des bâtiments, etc.

Pour les pierres sujettes à s'effleurir à l'air, on a imaginé de donner d'avance aux parements des murs à peu près l'aspect qu'ils peuvent prendre avec le temps; c'est ce que l'on appelle faire des *vermiculures*.

352. *Appareil.* C'est le détail de la disposition des pierres dans un édifice. *Appareiller* est faire d'avance les dessins qui donnent les formes et les dimensions des pierres qui doivent entrer dans l'édifice. On appelle aussi *appareiller*, tracer la besogne aux tailleurs de pierres, d'après les plans d'appareil; l'*appareilleur* est un premier ouvrier chargé de ce tracé et de diriger la pose des pierres et leur raccordement.

353. *Taille de la pierre.* On taille la pierre dans un endroit disposé à cet effet, près de l'édifice à construire, avant de la mettre en place; c'est ce qu'on appelle *taille sur le chantier*. Cependant la taille de quelques parties ne peut se faire qu'après la pose, c'est ce que l'on nomme *taille sur le tas;* les moulures sont dans ce cas; il en est de même du *ravalement*, qui consiste à régulariser les parements. En même temps que l'on fait le ravalement, on exécute le *rejointoiement*, qui consiste à remplir les parties apparentes des joints et des lits avec du mortier.

Pour tailler la pierre, on fait usage de différents outils, dont la forme dépend de la dureté de la pierre, de sa nature et de l'usage auquel on la destine. La pierre calcaire tendre se débite à la scie à dents; elle se taille avec le *ciseau*, la *pioche à pierre tendre*, le *marteau*, dit *rustique* et le *marteau tranchant*, et on termine les parements à la *ripe*. La pierre calcaire dure se débite au moyen de la scie sans dents et du sable; elle se taille avec le *têtu*, le *ciseau*, la *gradine*, la *pioche*, le *poinçon*, le *marteau breté*, la *boucharde*, et on termine *à la ripe*. Les marbres et les calcaires très-durs, les granites, les laves, les basaltes, les grès sont taillés à la pointe. On se sert quelquefois, pour tailler les grès, du marteau dit *épinçoir*, que l'on emploie pour fendre les grès, en étonnant la masse par des petits coups de ce marteau frappés dans une direction déterminée, résultat que l'on obtient également avec la pointe.

Dans beaucoup de localités, pour la pierre destinée aux ouvrages hydrauliques, tels que ponts et écluses, on se contente du fini non

désagréable que laisse la *boucharde ;* à Paris les parements sont *layés* (554).

L'ouvrier, pour tailler sa pierre, amène le parement qu'il dresse sous un angle de 17 degrés environ avec la verticale.

**554.** *Les outils mis en usage pour la taille de la pierre sont :*

1° Le *têtu*, lourd marteau en fer aciéré, portant une tête carrée d'un côté et une pointe de l'autre, et qui sert pour dégrossir les pierres très-irrégulières et de beaucoup d'*abatage ;*

2° Le *ciseau* en fer à tranchant aciéré ; quelquefois le tranchant est remplacé par une simple pointe, ce qui donne le *poinçon ;* les *gradines* sont des ciseaux dont le tranchant est dentelé, on en fait usage pour tailler les pierres très-dures ;

3° Le *maillet en charme*, de forme variable, servant à frapper sur la tête du ciseau, de la pointe ou de la gradine ;

4° La *pioche à pierre dure*, marteau en fer terminé par des pointes aciérées à 4 pans. La *pioche à pierre tendre* a à peu près la même forme que la précédente ; seulement une des pointes est remplacée par un tranchant de 3 à 4 centimètres de largeur, et l'autre par une *herminette* de même largeur ;

5° Le *marteau breté* ou *laye ;* c'est un marteau à deux tranchants découpés en dents ; pour les pierres tendres, un tranchant seul est ordinairement breté. Une pierre dressée au marteau breté est dite layée ;

6° Le *rustique*, qui est un marteau breté dont les dents sont beaucoup plus écartées ;

7° La *ripe*, tige en fer que l'ouvrier prend à la main ; elle porte un tranchant à chaque bout, l'un denté et que l'on passe sur la pierre après le marteau breté, et l'autre uni pour finir la taille ;

8° La *boucharde*, marteau à deux têtes carrées taillées en un grand nombre de têtes de diamant, et dont on frappe à plat les parements dégrossis à la pioche. Sur différents travaux hydrauliques, les parements des pierres sont entièrement terminés à la boucharde fine, avec laquelle on les frappe entre quatre ciselures régulières qui forment les arêtes de la pierre. A Paris, les parements des pierres sont layés, c'est-à-dire passés au marteau breté, puis finis à la ripe ;

9° L'*épinçoir*, espèce de marteau à deux tranchants non coupants ;

10° L'équerre en fer et les règles.

**555.** *Bardage, montage et pose de la pierre.* Une fois que la pierre est taillée, on procède à son *bardage*, qui consiste à la transporter au point où elle doit être employée. On fait usage à cet effet d'une voiture à deux roues, appelée *diable* ou *binard*, qui est manœuvrée par des hommes appelés *bardeurs*, aidés quelquefois d'un cheval. Pour les petites pierres, on emploie assez souvent une civière appelée *bard.*

Afin de faciliter la manœuvre de la pierre, le chef bardeur au moins est muni d'une *pince* en fer, dont une extrémité se termine en langue de chat, tandis que l'autre est recourbée et porte un talon.

Une fois le bardage opéré, la pierre se descend sur le *tas* en la faisant glisser sur un plan incliné, au moyen de rouleaux. On modère, si cela est nécessaire, la vitesse à l'aide d'une corde fixée à la pierre et s'enroulant sur un treuil ou un pieu de retenue. On peut aussi employer pour descendre la pierre sur le tas les appareils mis en usage pour l'élever, et qui consistent en une *chèvre* ordinaire, ou en une espèce de *grue*, appelée *sapine*, formée d'un grand arbre en sapin tournant sur

pivot et maintenu à la partie supérieure par un collier dans lequel tourne un fort goujon fixé à son sommet; des haubans convenablement disposés et en nombre suffisant, retiennent le collier. Sur plusieurs ateliers on remplace avec assez d'avantage la sapine simple par une autre formée de 4 grandes pièces de bois de sapin scellées fortement dans le sol aux sommets d'un carré.

Pour fixer la pierre au crochet de la mouffle de ces appareils, on emploie une corde sans fin, appelée *élingue* ou *braye*, que l'on dispose autour de la pierre. Crainte que les angles de la pierre ne *s'épauffrent*, on les garnit de petits paillassons aux points où porte l'élingue. Pour les monuments qui réclament une grande netteté de taille de pierre, on remplace l'élingue par un petit instrument en fer, appelé *louve*, qui se loge dans un trou fait avec soin dans la pierre. On ne peut employer la louve avec des pierres tendres, elle les ferait éclater. Souvent on remplace cet instrument, dont l'usage est assez coûteux, par une simple vis à filets triangulaires, dont la tête porte un anneau. On fait au milieu de la pierre, à l'aide d'un *trépan*, un trou de même diamètre que le noyau de la vis, de sorte qu'en y forçant cette dernière, ses filets pénètrent de toute leur saillie dans les parois du trou.

Une fois les pierres descendues ou montées sur le tas, on les conduit au point qu'elles doivent occuper au moyen de rouleaux en bois, dont le diamètre va en diminuant depuis le milieu jusqu'aux extrémités, afin que l'on puisse facilement changer la direction du mouvement, et que les pierres ne portent pas par les angles. Ces rouleaux ont de $0^m,06$ à $0^m,08$ de diamètre sur $0^m,60$ à $0^m,70$ de longueur; on les fait rouler sur des madriers en bois placés sur la maçonnerie, laquelle étant fraîche pourrait s'ébranler sans cette précaution.

*Pose de la pierre de taille.* Lorsque la pierre à poser est approchée à pied d'œuvre, on commence d'abord par la présenter dans la place qu'elle doit occuper, en la faisant reposer sur des cales en bois, et quelquefois en plomb, ayant une épaisseur égale à celle que l'on veut donner au joint de mortier, c'est-à-dire de 4 à 10 millimètres. Ces cales se placent aux angles de la pierre et au moins à 3 ou 5 centimètres des arêtes, afin d'éviter les écornures. Lorsque le poseur s'est ainsi assuré que la pierre a bien toutes les dimensions voulues, il la soulève à la louve, ou lui fait faire quartier sur le côté; puis il nettoie, et arrose si la pierre est tendre et spongieuse, l'assise inférieure et la pierre qu'il pose; il étend sur toute la surface que doit couvrir la pierre une couche de mortier fin, d'une épaisseur un peu plus forte que celle des cales; il met la pierre en place, et il frappe dessus avec un pilon ou un maillet en bois, jusqu'à ce que le mortier *souffle* de toutes parts, et que la pierre repose sur les cales. Il convient d'enlever les cales quand la pierre occupe sa position définitive.

Il arrive très-souvent que l'on pose les pierres de chaînes d'angles et

autres, de tablettes de couronnement, etc., en étendant de suite la couche de mortier fin, sans mettre de cales, et en réglant son épaisseur avec la truelle. Pour opérer ainsi, il faut que le mortier soit assez ferme, sans quoi le poids de la pierre le ferait couler, et on obtiendrait des joints d'une épaisseur trop faible et non uniforme, ce qui ne nuirait pas peu à la solidité de la construction.

Dans tous les cas, avant de poser la pierre, il faut s'assurer avec soin que le mortier ne contient aucun gravier dont la grosseur excède l'épaisseur que doit avoir le joint, ce qui obligerait, pour les retirer, de soulever la pierre déjà mise en place et ralentirait l'exécution.

Quelquefois les lits des pierres sont flacheux sur le derrière, c'est-à-dire que la queue se termine plus ou moins en pointe. Pour remédier à cet inconvénient, on remplit ces flaches avec des éclats de pierre dure que l'on enfonce dans le mortier.

Dans cette pose, l'ouvrier doit autant que possible rendre nul l'effet des petits défauts de la taille des parements ou des lits et joints; il doit apporter une grande attention à éviter les *balèvres*, qui nécessitent ordinairement un ravalement dispendieux. S'il se sert de la pince pour faire abatage, il doit, pour éviter les écornures, placer un bout de latte ou de planche sur le bord des arêtes de la pierre, au point où porte la pince.

Une fois que la pierre est bien en place sur un bon lit de mortier, il ne reste plus pour terminer la pose qu'à remplir les joints montants; ce que l'on fait ordinairement à l'aide de la *fiche* à dents en fer (lame en fer plat dentée sur son pourtour).

Un autre moyen de poser la pierre consiste à la placer sur cales, comme il en a été indiqué ci-dessus, en ayant toujours soin de nettoyer l'assise inférieure; puis à ficher les joints, c'est à-dire à les garnir de mortier que l'on y fait pénétrer au moyen d'une *fiche* à dents. Les dents de cet outil pressent le mortier et le font pénétrer sous la pierre; mais comme la pression est proportionnelle à la surface pressante, et qu'elle peut par conséquent être énorme, il arrive parfois que les pierres sont ébranlées; quelquefois aussi il y a impossibilité de faire pénétrer le mortier en tous les points du joint. Malgré ces inconvénients, cette manière d'opérer est fréquente, parce qu'elle est plus facile et plus expéditive que la première, qui doit toujours lui être préférée sous le rapport de la solidité de la maçonnerie. L'emploi de la fiche à dents n'est réellement d'un bon effet que pour les joints montants.

A Paris, et dans presque toutes les localités où l'emploi du plâtre est commun, on fait généralement usage d'un troisième moyen pour poser les pierres, et principalement les pierres tendres. Ce moyen consiste encore à poser les pierres sur cales, comme il a été indiqué ci-dessus, et à les *couler* ensuite, c'est-à-dire à remplir le lit et les joints avec du plâtre gâché très-clair ou coulis (530); on fait même quelquefois du

coulis avec du mortier de chaux ou de ciment. Pour faire ce remplissage, on ferme tout le contour des lits et des joints avec du plâtre ou du mortier d'une consistance suffisante, en laissant libre, à la partie supérieure des joints, une petite étendue sur laquelle on fait un godet dans lequel on verse le coulis ; on a soin de remuer constamment celui-ci en le versant, afin qu'il reste bien homogène et que l'eau ne s'introduise pas seule dans les joints.

Lorsque les pierres sont posées sur plâtre, la prompte solidification de cette matière oblige d'avoir recours à ce troisième moyen, surtout pour les pierres tendres; on n'aurait pas le temps, avant la prise, de placer convenablement la pierre sur un lit de plâtre d'abord étendu.

Il n'en est pas de même du mortier de chaux, et comme son coulis fournit toujours de mauvais résultats, il convient de n'en pas faire usage. La quantité d'eau qu'il contient étant absorbée par la pierre, il se forme presque toujours des vides que l'on remplit difficilement, malgré tous les soins que l'on met à le faire au fur et à mesure de cette absorption; et comme de la dessiccation du coulis de mortier de chaux il résulte encore un retrait qui augmente ces vides, il arrive très-souvent que la pierre repose entièrement sur les cales, lesquelles, en pourrissant, occasionnent des tassements considérables dans les maçonneries.

Lorsque la pose de la pierre se fait dans l'eau, il y a impossibilité de faire usage de mortier, qui serait délayé et lavé ; alors on se contente de poser simplement les pierres sur cales, qui doivent être en plomb de préférence au bois.

Quand toutes les pierres d'une assise sont posées, il arrive presque toujours que quelques-unes sont plus élevées que les autres ; il y a alors nécessité de dresser tout le lit supérieur de l'assise, en enlevant toutes les saillies, avant de poser les pierres de l'assise qui doit la couvrir ; sans cette précaution, il est impossible d'obtenir une belle et solide maçonnerie.

Enfin, quand l'ensemble de la maçonnerie est terminé, on procède au *ravalement*, au *ragrément*, et au *rejointoiement* des surfaces apparentes.

*TABLEAU du volume de mortier ou de plâtre employé par mètre cube de différentes maçonneries de pierre de taille.*

| | mc. |
|---|---|
| Libages ordinaires. . . . . | 0,090 |
| Assises ordinaires de 0m,30 à 0m,50 de hauteur. . . . . | 0,075 |
| *Idem.* de 0m,50 à 0m,80 *id.* . . . . . | 0,065 |
| Parpaings et assises de 0m,25 à 0m,30 d'appareil. . . . . | 0,080 |
| Claveaux de plates-bandes droites. . . . . | 0,085 |
| Voûtes en berceau et en arc de cloître. . . . . | 0,100 |
| Voûtes d'arête et sphériques. . . . . | 0,105 |
| Marches, seuils et appuis, pour garnissage et coulement. | 0,175 |
| Dalles de 0m,06 à 0m,10 d'épaisseur, 0m,023 par mètre superficiel. . . . . | 0,290 |

556. *Maçonnerie de moellons.* On distingue, quant à leur nature, trois espèces principales de moellons :

1° Les *moellons de roche* (518), que l'on emploie pour des murs et des massifs qui doivent avoir une très-grande résistance ;

2° Les *moellons de banc-franc*, qui servent à élever les murs de clôture et ceux des bâtiments en élévation, à cause de la légèreté qu'ils acquièrent en séchant ;

3° Les *moellons tendres*, avec lesquels on peut faire à peu de frais des parements parfaitement dressés, à cause de la facilité avec laquelle on les taille.

Les moellons de roche et de banc-franc que l'on emploie à Paris et dans les environs viennent des plaines de Vitry, d'Arcueil, de Montrouge, de Passy, du Moulin de la Roche, de Vaugirard, etc. Les moellons tendres qui sont les plus traitables et qui soutiennent le mieux les arêtes sont tirés des carrières de Saint-Maur, de Creteil, et de Carrière-Saint-Denis, Houilles, Nanterre, Montesson, ainsi que du Buisson-Richard, situé à Carrière-Sous-Bois, près Saint-Germain-en-Laye.

Sous le rapport de leur emploi, les moellons se divisent en quatre classes :

1° Les *moellons ébousinés*, qui sont ceux que le maçon taille lui-même légèrement sur les lits et les joints, avec sa hachette, au fur et à mesure qu'il les emploie ; on en construit ordinairement les murs de fondation, et les autres qui doivent recevoir un enduit.

2° Les *moellons smillés*. On désigne ainsi les moellons dont on a taillé assez proprement les parements, les lits et les joints, et que l'on emploie à la construction des voûtes et des murs dont la surface est seulement rejointoyée.

3° Les *moellons piqués*. Ces moellons sont taillés comme les précédents, mais avec plus de soin, de manière à en rendre les arêtes vives et bien droites.

4° Les *moellons d'appareil*. On nomme ainsi des moellons parfaitement équarris et parementés comme la pierre de taille, et que l'on taille sous différentes formes pour carreaux, angles de soupiraux, sommiers et voussoirs pour baies de portes cintrées ou en plates-bandes, etc. Les ouvrages faits avec ces moellons ne diffèrent de ceux construits en pierre de taille que par les moindres dimensions de leurs matériaux.

Les moellons qui n'ont subi aucun travail autre que celui de la carrière sont désignés sous le nom de moellons bruts ; lorsqu'ils sont durs et qu'ils ne contiennent pas de *bousin*, on les emploie dans cet état pour faire des massifs et autres maçonneries d'une grande épaisseur.

Les moellons trop petits pour être taillés sont employés comme *garnis* à l'intérieur des murs, ou en remplissage dans les reins des voûtes.

Pour liaisonner les moellons, on suit les mêmes règles que pour la pierre de taille (550) ; ainsi il faut avoir soin, dans une même assise, de placer un moellon court à côté d'un long, et de ne jamais mettre les joints en ligne droite ; il faut éviter aussi que les joints verticaux se correspondent dans des assises en contact.

On pose simplement à la main les moellons sur une couche de mortier de 2 à 3 centimètres d'épaisseur sans faire usage de cales ; une fois posés, on les affermit en frappant dessus quelques coups de marteau, qui font souffler le mortier de tous côtés de manière que l'épaisseur des

lits et des joints n'excède pas 2 centimètres. Les vides qui restent entre les moellons principaux se garnissent de mortier et d'éclats de pierre ou de moellons plus petits (espèce de blocage) (548).

*TABLEAU des volumes de mortier et de plâtre en poudre employés par mètre de différentes maçonneries de moellons.*

| MAÇONNERIE. | MORTIER. | PLATRE en poudre. |
|---|---|---|
| | m. cub. | m. cub. |
| Maçonnerie de blocage en moellonnaille de forme irrégulière, et dont le volume n'excède pas 0m.c..003. . . . . | 0.400 | 0.320 |
| Maçonnerie ordinaire de massifs ou de murs, en moellons, dont les parements sont bruts ou smillés et les lits et joints ébousinés et équarris. . . . . | 0.320 | 0.250 |
| Maçonnerie de moellons smillés ou d'appareils, pour parements de murs, voûtes, etc. . . . . | 0.250 | 0 200 |

**337.** *Maçonnerie de meulière.* Pour parements, la meulière s'emploie en moellons smillés et quelquefois piqués (556). Dans certaines constructions, auxquelles on veut donner un aspect pittoresque, on l'emploie brute ou quelquefois grossièrement smillée, et on rocaille les joints des parements avec de la pierre meulière brûlée et concassée, dont on assujettit les fragments avec du ciment romain auquel on a donné la couleur rouge de la meulière brûlée (520) (*Art de construire*).

*TABLEAU des volumes de mortier et de plâtre en poudre nécessaire à la pose d'un mètre cube de maçonnerie de meulière.*

| DÉSIGNATION DES MAÇONNERIES. | MORTIER. | PLATRE en poudre. |
|---|---|---|
| | m. cub. | m. cub. |
| Maçonnerie de blocage ou garni de meulière dont le volume n'excède pas 0m.c..003. . . . . | 0.450 | 0.360 |
| Maçonnerie ordinaire en meulière brute, telle que massifs ou murs dont les parements sont recouverts d'un enduit ou rocaillés. . . . . | 0.350 | 0.290 |
| Maçonnerie de meulière piquée ou smillée pour parements de murs, de voûtes, etc. . . . . | 0.270 | 0.220 |

**338.** *Maçonnerie de briques.* Il faut éviter de briser les briques pour les employer, et on doit les disposer de manière qu'elles se relient le mieux possible entre elles. La fig. 2, planche III, représente leur disposition dans une assise d'un mur dont l'épaisseur est égale à la longueur d'une brique; la fig. 3, planche III, est la disposition à adopter pour une épaisseur d'une brique et demie, et les fig. 4 et 5, même

planche, sont des dispositions que l'on peut employer pour des murs de l'épaisseur de deux briques. Dans tous les cas, on a soin de croiser les joints de deux assises consécutives, afin que les briques se relient dans le sens vertical aussi bien que dans le sens horizontal. Il convient de ne mettre la brique en place qu'après l'avoir plongée dans l'eau ; sans cette précaution, elle absorberait l'eau du mortier ou du plâtre. Cette précaution doit être aussi prise pour les moellons absorbants sortis depuis longtemps de la carrière. L'épaisseur des joints de mortier ou de plâtre ne doit pas excéder $0^m,01$ (*Art de construire*).

**539.** *Chaînes en pierre de taille, soubassements et baies de portes et croisées dans les constructions en moellons.* Ces chaînes peuvent être horizontales ou verticales. Dans le premier cas, sans présenter d'inconvénient, elles ont l'avantage de bien relier les petits matériaux placés au-dessus et au-dessous. Dans le second cas, elles augmentent la solidité et la stabilité aux points où elles se trouvent ; mais elles ont l'inconvénient de produire un gonflement ou un tassement différent des autres parties de la maçonnerie, ce qui occasionne des lézardes quand on n'a pas soin de laisser comme on le fait à Paris, quand on juge convenable de construire en pierres de taille les angles des maisons, du jeu entre les moellons et les chaînes en pierre. Ce jeu permet le gonflement du plâtre qui se cristallise, et ensuite son retrait, ou le tassement du mortier, mouvements qui sont proportionnels au nombre des joints et à leur épaisseur. On ne relie les moellons aux chaînes, et on n'enduit les parements du mur que quand le retrait s'est opéré dans toute la masse.

Il convient qu'un mur en moellons ou en briques soit chaussé d'une assise en pierre de taille, un peu enterrée et s'élevant au-dessus du sol, que l'on nomme *soubassement*. Dans les murs on doit placer la pierre la plus résistante à la surface du sol.

Un moyen efficace d'empêcher l'humidité de s'élever dans les murs est de placer une couche de bitume sur la première assise au-dessus de la fondation.

Les jambages, les linteaux et les appuis des croisées et des portes se font souvent en pierre de taille, surtout dans les constructions en briques. Il est nécessaire que les pieds-droits soient de plusieurs assises et de pierres d'inégales longueurs, afin qu'ils se relient bien avec les petits matériaux qui composent les trumeaux.

Les linteaux sont quelquefois formés d'une seule pierre ; mais alors il faut construire au-dessus une voûte qui reporte le poids de la maçonnerie supérieure sur les pieds-droits. Il vaut mieux construire les linteaux au moyen de plusieurs pierres disposées en voûte, dite *plate-bande*, que l'on doit appareiller avec soin.

On était dans l'usage à Paris, pour les maisons construites en moellons, de faire les linteaux en bois ; ce qu'il faut éviter, car le bois pour-

rissant, c'est ordinairement par là que les maisons périssent. Aujourd'hui on fait un usage presque exclusif du fer.

360. *Voûtes d'édifices.* Dans les bâtiments civils, on ne fait ordinairement usage de voûtes que pour les étages souterrains. Elles sont généralement en plein cintre, et on les fait en moellons, à l'exception des pieds-droits des portes de communication d'un berceau à l'autre, lesquels sont généralement en pierre de taille. Les voûtes de caves sont ordinairement en moellons piqués, ou au moins smillés (556 . Les moellons bruts ne présentent pas une solidité suffisante; il faut que les voussoirs soient appareillés, ou au moins taillés de manière qu'étant posés les joints tendent à l'axe; sans cela, la solidité de la voûte ne consisterait que dans l'adhérence du mortier.

Il arrive cependant quelquefois que l'on construit des voûtes pour les pièces du rez-de-chaussée des édifices publics tels que mairies, halles publiques, tribunaux. Lorsque les pièces voûtées doivent servir de lieu de réunion, on adopte le plein cintre, et il est rare alors qu'on les exécute en pierre de taille; pour réduire la dépense, on les fait le plus souvent en moellons, en briques ou en poterie. Quant aux voûtes d'arêtes, comme toute la poussée se reporte sur les pieds-droits et que les voussoirs inférieurs ont à résister à un effort considérable, on est obligé de les construire en pierre de taille.

Pour les voûtes en petits matériaux, il faut employer le meilleur mortier ou plâtre possible, afin que, reliant entre elles toutes les parties, la voûte et les points d'appui exigent une moindre épaisseur. C'est pour les mêmes raisons que l'on doit employer, surtout pour les voûtes exécutées hors du sol, les moellons de la plus faible densité, ou mieux la brique, qui fait parfaitement corps avec le plâtre ou le mortier, ou mieux encore la brique creuse ou la poterie, lesquelles, ayant la même adhérence que la brique, sont beaucoup plus légères (527).

Pour les voûtes, comme pour les murs en élévation, les moellons doivent être disposés par cours d'assise, de manière à faire croiser les joints de deux assises voisines, et de telle sorte que dans une même assise les moellons formant boutisse soient placés entre deux carreaux (550). Si la voûte a une épaisseur de plusieurs moellons, le second rang de moellons doit se relier avec le premier.

On monte les deux côtés de la voûte à la fois, afin que leur poussée se fasse équilibre sur le cintre et ne le détruise pas, et que de plus le mortier prenant la même consistance des deux côtés, le tassement soit égal. On ne place les planches du cintre qu'au fur et à mesure que l'on élève la voûte, afin que l'ouvrier ait l'ouvrage devant lui et de plus placé à une hauteur convenable pour sa facile exécution.

Quand il ne reste plus que trois assises à poser, on commence à bander et à fermer la voûte par l'une de ses extrémités. On pose de part et d'autre deux ou trois moellons aussi longs que possible que l'on appuie

sur le cintre; une fois en place, on les affermit à coups de marteau sur un bourrelet de mortier soufflant; on recouvre leur face de mortier, et on introduit alors la clef bien taillée d'avance en forme de voussoir dans le vide laissé entre les moellons que l'on vient de poser; on l'enfonce en la frappant avec une *dame* du poids de 15 à 20 kilog., jusqu'à ce qu'elle s'appuie sur le cintre. Il est évident que l'on doit prendre les plus beaux et les meilleurs moellons pour former les dernières assises de voussoirs, et surtout la clef.

Lorsque ces premiers moellons sont bien assurés et que le mortier souffle de toutes parts, on introduit dans les joints, à coups de marteau, des éclats de pierre dure. Cette première clef étant bien bandée, on continue à fermer la voûte en opérant de même et en allant à reculons.

Les voûtes en briques peuvent se construire de la même manière que celles en moellons, en leur faisant former voussoir sur leur épaisseur, et en les plaçant en carreaux et boutisses si l'épaisseur de la voûte est suffisante. Dans ce cas, on peut les relier avec du plâtre ou du mortier en ayant soin de garnir les joints à l'extrados avec des éclats d'ardoise ou de pierre mince, à moins cependant que les briques aient la forme de voussoirs.

Quelquefois les briques sont simplement posées à plat sur le cintre, et alors reliées par du plâtre ou du ciment romain; on emploie ce procédé pour faire des voûtes minces et plates. On prépare dans les murs qui doivent porter la voûte des coussinets dans lesquels la voûte vient s'engager et s'appuyer. Ces voûtes sont le plus souvent formées de plusieurs épaisseurs de briques.

Pour les voûtes en briques, il faut prendre la précaution indiquée n° 558, qui consiste à tremper les briques dans l'eau avant de les mettre en contact avec le plâtre, sans quoi elles absorbent l'eau qui a servi à gâcher celui-ci, qui alors ne contient plus la quantité d'eau suffisante à sa cristallisation.

On ne doit jamais fermer la voûte à la clef avant que le plâtre ait fait tout son effet, sans quoi le gonflement du plâtre dérangerait les pieds-droits de leur aplomb.

On doit commencer les voûtes en arc de cloître par la clef, et aller en s'avançant vers les naissances; sans cette précaution on aurait beau laisser du jour à la clef, comme les quatre parties de la voûte se contre-butent mutuellement entre elles, la poussée due au gonflement du plâtre se transmettrait toujours sur les pieds-droits.

**361.** *Fondations.* Lorsque le sol est formé jusqu'à une certaine profondeur de terres végétales qui ont été remuées, ou de matières rapportées, comme il n'offre pas assez de résistance pour supporter sans affaissement les constructions à ériger, on est obligé de le déblayer, et de descendre la fouille jusqu'à ce que l'on ait atteint une couche de ter-

rain qui présente une compacité et une résistance suffisantes. Il arrive souvent que la couche solide se trouve à une profondeur telle, que l'on doit renoncer à l'atteindre par les fouilles et à y asseoir directement les fondations; alors on a recours à des moyens auxiliaires pour donner au terrain qui la surmonte la solidité requise. Ces moyens varient selon la nature du sol, nature que l'on détermine, soit par des sondages, soit en creusant des puits.

Malgré le grand nombre de nuances sous lesquelles les terrains se distinguent, si on les considère sous le rapport du plus ou moins de résistance qu'ils peuvent offrir pour les fondations, on peut les diviser en trois classes principales.

La première classe renferme les terrains les plus favorables, sur lesquels on peut établir directement les fondations; tels sont les diverses espèces de rocs, les tufs, les marnes et les terrains pierreux qu'on ne peut attaquer qu'à la mine ou au pic.

La deuxième classe comprend tous les terrains graveleux et sablonneux, qui ont la propriété d'être incompressibles lorsqu'ils sont encaissés.

La troisième classe renferme tous les terrains qui présentent des difficultés plus ou moins grandes, lorsqu'il s'agit de les consolider et de leur donner une résistance uniforme suffisante dans toute l'étendue des fondations. Les terrains mouvants, comme le sont principalement ceux qui sont glaiseux, et les terrains compressibles, tels que ceux qui sont tourbeux ou fraîchement rapportés, appartiennent à cette espèce.

Lorsque les fouilles des fondations sont descendues à une profondeur convenable et ont atteint un terrain suffisamment résistant, après en avoir nivelé et dressé parfaitement le fond, on procède à l'exécution de la maçonnerie de fondation. Si cette maçonnerie est en moellons ou en meulière, l'ouvrier choisit les morceaux les plus gros et les plus résistants et il commence son travail en en posant une première assise sur un lit de mortier qu'il a étendu sur le fond de la fouille, en les liaisonnant les uns avec les autres et en les frappant avec sa hachette pour les bien affermir et imprégner de mortier.

Quoique la maçonnerie des fondations soit cachée, on doit avec plus de soin encore que pour celle à parements vus, prendre toutes les précautions qui assureront sa solidité. Une mauvaise exécution occasionnerait des effets très-nuisibles à la stabilité de la construction: les murs se fendraient, perdraient leur aplomb, et il se formerait des crevasses dans les voûtes et dans toutes les parties de l'édifice.

Pour que les fondations soient solides et que le tassement soit uniforme dans toutes les parties de la construction, il faut composer chaque assise de matériaux de même hauteur et de même dureté, en plaçant les plus résistants dans le bas. Si quelques matériaux sont tendres et de médiocre qualité, on évite de les employer pour les parties de fondations qui auront à supporter de grandes masses de maçonnerie ou de fortes charges; ils pourraient s'écraser et compromettre la solidité de la construction, sinon en amener la ruine.

Lorsqu'une fondation repose sur le sol naturel incompressible, il

uffit de lui donner de $0^m,05$ à $0^m,10$ d'empatement, c'est-à-dire de saillie, sur chaque face du mur qu'elle doit supporter; cela suffit pour que l'on soit sûr que la fondation sera pleine sur une épaisseur au moins égale à celle du mur et qu'il n'y aura pas de porte-à-faux, malgré le peu de soin que l'on met à bien dresser les parements dans les tranchées, et aussi pour que la résistance soit plus grande en raison de l'excès de charge que supporte la fondation.

Pour des *piliers isolés supportant de fortes charges*, l'empatement précédent $0^m,05$ à $0^m,10$ de la fondation sur tout le pourtour de chaque pilier est insuffisant; on est obligé de les fonder sur un mur continu construit comme pour le mur que remplacent ces piliers. Souvent même, afin de répartir la pression des piliers sur toute la longueur du mur de fondation, on dispose ce mur en voûtes renversées dont les naissances sont placées sous les socles des divers piliers. Dans certains cas même, lorsqu'il y a plusieurs rangs de piliers, ceux-ci reposent sur les naissances de voûtes d'arête renversées qui reportent la charge sur toute l'étendue de l'espace qui sépare les piliers.

C'est surtout pour des piliers isolés que l'on doit placer les pierres les plus résistantes au niveau du sol jusqu'à une profondeur de $0^m,15$ à $0^m,20$ (n° 559).

Afin que le tassement soit le même dans tous les piliers isolés, on les construit du même nombre d'assises, on donne la même épaisseur aux joints, et on taille les lits pleins et bien perpendiculaires à l'axe.

Dans un but d'économie, quand on est obligé de descendre à une grande profondeur pour trouver le sol résistant, les fondations peuvent être composées d'une série de piliers convenablement espacés et reliés à leur sommet par des voûtes en plein ceintre ou en arc de cercle, sur lesquelles on érige la construction.

Pour les constructions de quelque importance, on était dans l'usage de commencer les fondations par une ou plusieurs assises de libages (550), mais depuis quelque temps on y a substitué le béton, qui ne coûte qu'environ le quart des bons libages; on donne à la couche de béton de $0^m,30$ à $0^m,80$ d'épaisseur, avec une saillie sur les parements de la fondation.

Les fondations en béton doivent être exécutées par couches horizontales. Afin que les parties faites un jour se raccordent bien avec celles qui se posent le lendemain, on termine leurs extrémités par redans inclinés, et lorsqu'on recommence, avant de placer du nouveau béton, on applique une couche de mortier frais sur tout le béton posé la veille et déjà raffermi (545).

*Si le sol incompressible est situé sous l'eau ou sous des couches compressibles à des profondeurs si grandes que l'on ne puisse le mettre à découvert sans des dépenses trop considérables, on a recours à l'un des moyens suivants :*

1° *Fondations sur pilotis.* Ce moyen consiste à enfoncer, dans toute l'étendue des fondations, des pieux espacés de 0m,80 à 1m,20 d'axe en axe, selon la charge qu'ils doivent supporter et suivant leur diamètre, qui est en général le 1/24 de leur longueur sans avoir moins de 0m,18. Ces pieux battus au refus peuvent supporter jusqu'à 50 kilog. par centimètre carré de section (127 et 218).

Les pieux étant enfoncés en quinconce, on les recèpe tous de niveau à une hauteur convenable, on enlève entre eux la terre ameublie par le battage, et on la remplace par un blocage en pierres sèches si l'on opère à sec, ou par du béton ou de la maçonnerie à mortier hydraulique dans le cas contraire. On a soin de comprimer fortement ces matériaux à mesure qu'on les pose, afin qu'ils maintiennent bien les têtes des pieux, qu'ils augmentent les frottements latéraux s'opposant à l'enfoncement, et qu'ils ajoutent le plus possible à la rigidité du système.

On pose ensuite un grillage en charpente, formé de longrines reliant les files longitudinales de pieux et de traversines s'assemblant à mi-bois sur les longrines. On arase le remplissage au niveau du grillage, et sur le tout on établit une plate-forme en madriers, sur laquelle on élève l'édifice.

Comme la plate-forme unie adhère mal à la maçonnerie, il peut être convenable de la remplacer par une forte couche de béton enveloppant les têtes de pieux, sauf à placer sur ce massif, si on le juge nécessaire, un ou deux rangs de forts libages pour répartir convenablement la pression.

Ce premier mode peut s'employer soit qu'il s'agisse de fonder sur des terrains secs qui ne sont incompressibles qu'à une certaine profondeur, soit qu'il s'agisse de fonder dans l'eau. Les procédés suivants sont spéciaux à ce dernier cas.

2° *Fondations à l'aide de batardeaux.* On nomme batardeaux, des digues dont on circonscrit l'emplacement de la fondation, afin de pouvoir épuiser l'eau, et ensuite établir la fondation sur le sol mis à sec, en opérant comme il a été indiqué ci-dessus.

Lorsque la profondeur d'eau ne dépasse pas 1 mètre, le batardeau se fait uniquement en terre, en lui donnant de 0m,80 à 1m,20 d'épaisseur moyenne.

Si l'eau a une certaine vitesse ou une profondeur de 1 mètre à 1m,50, on enfonce avec le mouton une file de pieux, contre laquelle on fixe des madriers jointifs, et c'est contre ce barrage en charpente, destiné à défendre la terre, que l'on tasse celle-ci pour terminer le batardeau. Quelquefois on a remplacé les madriers par des fascines.

Quand la profondeur de l'eau excède 1m,50, le batardeau s'établit encore plus solidement. On bat deux files parallèles de pieux espacés de 1 mètre environ ; on réunit les pieux de chaque rang par des madriers que l'on cloue horizontalement; contre ces madriers on appuie des pal-

planches assemblées entre elles à rainure et languette, et que l'on enfonce jusqu'à ce que leur extrémité soit inférieure au sol sans consistance. Après avoir enlevé la vase entre les deux cloisons ainsi formées, on remplit leur intervalle avec de la terre. Des entretoises reliant entre elles les deux cloisons ajoutent beaucoup à la solidité du batardeau.

On fait encore des batardeaux en maçonnerie hourdée en mortier hydraulique, et dans plusieurs ports de mer on en a établi en béton.

3° Pour fonder à de grandes profondeurs, on emploie encore quelquefois un *caisson* en bois que l'on amène sur l'emplacement de la fondation, et sur le fond plat duquel on établit la maçonnerie. Le caisson finit par s'enfoncer jusque près du sol, par suite du poids de la maçonnerie; alors, afin de terminer l'échouage convenablement, on laisse pénétrer l'eau dans le caisson. On enlève ensuite les parois latérales du caisson, qui n'étaient retenues que par des tirants. Il est évident que le sol a dû être à l'avance consolidé par des pieux, si cela était nécessaire, et nivelé.

4° Le moyen de fonder par *encaissement* est généralement préféré au précédent à cause de sa simplicité et de son prix modéré. Il consiste à former autour de l'emplacement des fondations une enceinte de pieux et de palpanches; à draguer dans cette enceinte jusqu'à ce que l'on atteigne un sol suffisamment compressible, et à la remplir de béton, sur lequel on érige ensuite la construction.

Si le fond du lit était un roc dans lequel il y a impossibilité d'enfoncer des pieux, on aurait recours à un caisson sans fond, construit sur le chantier, et dont les parois seraient formées de potaux montants et de fortes palplanches, le tout maintenu par plusieurs cours d'entretoises horizontales. On amène le caisson sur l'emplacement de la fondation, on le fait échouer en le chargeant convenablement, puis on établit le massif de béton

Dans ces derniers temps, pour fonder à de grandes profondeurs sous l'eau, plusieurs ingénieurs, et entre autres M. Pluyette, au pont de Nogent-sur-Marne (*Annales des Ponts et Chaussées*, année 1856), ont fait usage d'un encaissement en tôle. On commence par draguer jusqu'au terrain solide dans tout l'emplacement de la pile; on échoue l'encaissement, et après avoir dragué à l'intérieur, de manière à unir le fond, on coule une couche de béton d'une épaisseur suffisante; quand cette couche est solide, on épuise l'eau, et alors on monte la pile à sec.

*Fondations sur un sol compressible.* On parvient à donner aux terrains compressibles un certaine degré de résistance en y battant des pieux en bois, ou en y enfonçant de distance en distance un pieu en bois que l'on retire pour remplir l'alvéole qu'il laisse avec du mortier ou du béton que l'on pilonne fortement au fur et à mesure de leur pose. On fait autant de ces pieux en béton que cela est nécessaire pour rendre le sol résistant, puis on recouvre ce sol d'une couche de béton bien pi-

lonné. Lorsque le sol est constamment sec, on peut à la rigueur substituer le sable au mortier ou béton.

La tête du pieu doit être garnie d'une frette en fer pour résister aux chocs du mouton, et percée d'un trou dans lequel on passe une pince ou une barre de fer, qui sert, pendant le battage, à remuer et tourner le pieu au fur et à mesure qu'on l'enfonce, de manière à lisser les parois de l'alvéole et à leur donner une certaine consistance qui permet la pose du béton sans qu'elles s'éboulent; ce mouvement imprimé au pieu le rend facile à retirer quand il est entièrement enfoncé.

Si l'espace occupé par la fondation était très-grand, on pourrait, après avoir consolidé le sol au moyen de pieux en béton, le couvrir d'un massif de sable de $0^m,60$ à $0^m,80$ d'épaisseur, que l'on forme par couches successives de $0^m,15$ à $0^m,20$, parfaitement pilonnées et mouillées d'un lait de chaux très-épais; ce massif, que l'on couvre également d'une couche de béton bien pilonné, est incompressible et offre l'avantage de répartir uniformément la charge sur toute l'étendue de la fondation.

*Racinaux.* On nomme ainsi des pièces de charpente méplates, de $0^m,30$ sur $0^m,12$ que l'on place bien de niveau sur le sol compressible, et sur lesquelles on fixe avec des chevillettes une plate-forme en madriers de chêne de $0^m,085$ d'épaisseur. Avant de placer cette plate-forme, on a soin de remplir l'intervalle des racinaux avec du béton ou avec des moellonnailles posées à bain de mortier. C'est sur la plate-forme que l'on établit la fondation.

On conçoit que sur un sol consolidé par des pieux en bois ou en béton on peut encore faire usage d'une plate-forme en bois pour bien répartir la pression; mais le plus souvent on emploie une couche de béton assez forte pour qu'elle ne puisse se briser.

Quand le *sol* est *très-compressible*, on commence par lui donner un certain degré de solidité, soit en le chargeant de pierres qui s'y enfoncent, soit en y faisant entrer des pieux par le gros bout, afin que l'élasticité du terrain ne les soulève pas, soit encore en combinant ces deux moyens, c'est-à-dire en enfonçant des pierres entre les pieux. Sur le sol ainsi préparé, on pose ensuite, soit la plate-forme en bois, soit la couche de béton si l'on ne craint pas sa rupture.

*Les fondations sur des sols argileux détrempés par des eaux* sont celles qui offrent le plus de difficultés. En vertu de leur viscosité et de leur élasticité, ces terrains se comportent à peu près comme des liquides. Ils transmettent la pression en tous sens; ils s'affaissent inégalement pour peu qu'ils ne soient pas chargés uniformément; les pilotis n'y adhèrent pas et tendent à sortir quand on bat les voisins. Il faut, pour construire avec quelque sécurité sur un terrain de cette nature, avoir recours à des plates-formes d'une grande étendue, à de larges empatements, répartir les pressions avec une grande uniformité, même pendant l'exécution du travail, et souvent charger par des remblais

provisoires les abords de la construction. Il est même prudent, avant d'élever les parties supérieures de l'édifice, de charger les massifs inférieurs, pendant plusieurs mois, d'un poids au moins égal à celui qu'ils auront à supporter plus tard.

Les difficultés sont plus grandes encore lorsque ces terrains sont noyés. On est obligé alors d'avoir recours à la fois aux moyens de fonder sous l'eau, et à ceux relatifs aux terrains compressibles.

Les *enrochements* sont des massifs de maçonnerie en pierres sèches, formés en jetant simplement, sans apprêt, des blocs dans l'eau, et dont on entoure les fondations qui peuvent être affouillées, comme le sont souvent celles des piles de ponts, des jetées, etc.

*Immersion du béton.* Quand la profondeur d'eau n'atteint pas $1^m,00$, le béton s'immerge à talus coulant. C'est-à-dire qu'on décharge sur le bord un massif de béton que l'on presse à la dame, de manière à le faire glisser doucement sous l'eau. On charge successivement le bord du massif ainsi obtenu, et en dressant le bourrelet on fait insensiblement avancer le talus et la masse jusqu'au parfait remplissage de la fouille, en même temps que l'on tasse la maçonnerie à la dame plate, à mesure de l'avancement du travail.

En avant de l'atelier d'immersion, des ouvriers, armés de raclettes en tôle et de larges balais en bouleau, nettoient, par des mouvements doux, le sol des fondations au pied du béton, et entraînent les vases dans des trous, d'où on l'extrait. De plus, à chaque reprise du travail, des hommes, munis de larges balais en paille, nettoient, sans agiter l'eau, la surface du béton précédemment coulé. Enfin chaque fois que le béton doit rester exposé sans revêtement à l'action des eaux, on a soin de dresser, comprimer et lisser, au moyen d'un rouleau en fonte ou en pierre, la couche supérieure du massif.

Quand la hauteur d'eau excède $1^m,00$, plusieurs procédés, différents seulement par leurs détails, peuvent être employés; le plus usité, et celui qui paraît donner les meilleurs résultats, consiste à opérer l'immersion du béton au moyen de caisses prismatiques à fond mobile, contenant chacune environ un sixième de mètre cube, descendues, à l'aide d'un treuil, jusque sur le fond des fouilles, puis remontées seulement de la quantité nécessaire pour en permettre la vidange.

**362.** *Outils d'un compagnon maçon.* Un maçon se sert :

1° De deux *auges* en bois de $0^m,75$ de longueur en haut et $0^m,50$ au fond, sur $0^m,50$ de largeur en haut et $0^m,30$ au fond, et de $0^m,22$ à $0^m,26$ de profondeur;

2° D'une *truelle* de $0^m,19$ de longueur, moins large à l'extrémité que près du manche. A Paris, quand elle sert à prendre le mortier, on l'appelle *guerluchone;* la *truelle* est employée pour le plâtre. La guerluchone est en fer et légèrement arrondie à son extrémité; la truelle est en cuivre et à angles vifs, afin qu'elle ne soit pas attaquée par le plâtre et que l'on puisse bien nettoyer les angles de l'auge avant de gâcher du nouveau plâtre;

3° D'une *hachette* qui a une tête carrée d'un côté; la tête sert à débiter les moellons et à les assujettir sur le lit du mortier, et le tranchant à tailler les moellons qui n'ont pas des formes convenables et surtout à rendre les lits horizontaux. Le *marteau* de maçon n'est autre chose qu'une grosse hachette dont le tranchant est remplacé par un pic très-allongé;

4° De *cordeaux* et de *fiches* en fer servant à indiquer la position du mur à construire. Pour fixer les cordeaux, on établit, de part et d'autre du mur à ériger, deux liteaux sur lesquels on cloue différentes traverses qui servent d'attaches aux ficelles. Quand le mur à établir se raccorde à d'autres existants, les fiches en fer, que l'on implante dans ces murs, servent à fixer les cordeaux;

5° D'un *fil à plomb* qui sert à élever les parements verticaux. Outre le tronc de cône en fer ou en cuivre, fixé à l'une des extrémités de la ficelle, une plaquette carrée en tôle ou en cuivre, dont le côté est égal au grand diamètre du tronc de cône, porte en son milieu un trou dans lequel passe librement la ficelle. De ces dispositions, il résulte que le maçon, appliquant une arête de la plaquette contre le parement du mur, le tronc de cône, qu'il a convenablement éloigné de la plaquette, sera tangent au parement du mur, si celui-ci est d'aplomb; il en sera éloigné si le mur surplombe, et il portera dessus s'il a du fruit;

6° De deux *règles* en bois de 2 mètres de longueur, dont une plate de $0^m,10$ sur $0^m,03$, et une carrée de $0^m,04$ de côté, que le maçon emploie pour battre les nus, faire les arêtes, etc. Six *chevillettes* à crochet en fer rond, de $0^m,30$ environ de longueur, lui servent à fixer les règles sur place;

7° D'un *niveau de maçon*. Rectangle formé par quatre règles en bois, au milieu d'un des grands côtés duquel est fixé un petit fil à plomb. Après avoir fait reposer la base de l'équerre sur le lit d'une pierre, si le fil correspond à une marque faite au milieu de cette base, c'est que le lit est horizontal. Pour vérifier si une surface d'une certaine étendue ou deux petites surfaces éloignées sont de niveau, le maçon applique une règle sur ces surfaces, et c'est sur la règle, qui doit avoir une égale largeur dans toute sa longueur, qu'il applique son équerre. Le *niveau de poseur* est triangulaire, et le fil à plomb est suspendu à l'un des sommets;

8° D'un *oiseau* pour le transport du mortier. Il est formé de deux planches clouées à angle droit, sous l'une desquelles se trouvent deux branches de $0^m,50$ environ de longueur, que l'ouvrier met à califourchon sur ses épaules. Pour descendre le mortier dans les fondations, on établit une espèce d'auge formée de deux planches clouées à angle droit, allant du bord supérieur de la fouille jusque sur le massif que l'on établit. Le porteur de mortier versant l'oiseau à la partie supérieure de l'auge, celle-ci amène le mortier au point où il doit être employé.

Pour le plâtre, on ne fait pas usage de l'oiseau; le maçon a deux auges (1°), et pendant qu'il emploie le plâtre qui est dans l'une, le garçon place dans l'autre le plâtre et la quantité d'eau convenable, sans agiter le mélange, et il l'apporte, en la plaçant sur sa tête, au maçon, qui seulement agite bien le plâtre dans l'eau (530);

9° D'une *taloche*. Petite planchette rectangulaire en bois léger, sur l'une des faces de laquelle se trouve une poignée également en bois; elle sert à appliquer le plâtre contre les parois des murs et contre les lattes des plafonds, et à l'y maintenir jusqu'à ce qu'il ait pris assez de consistance pour y rester adhérent;

10° D'une *truelle bretée*. C'est une plaque d'acier rectangulaire, portant un manche perpendiculaire à son plan; un des grands côtés de la plaque est denté et sert à dresser les surfaces, l'autre est uni et se passe sur le plâtre après le côté denté;

11° D'un *riflard*. Ciseau de $0^m,06$ de largeur, avec manche en bois; il sert à couper les repères et les nus, à dégager les cueillies d'angle, etc.;

12° D'un *guillaume*. C'est une espèce de rabot en bois dur, taillé en biseau et garni d'une lame d'acier à l'une de ses extrémités, et évidé de manière à former une

poignée vers l'autre extrémité. Le guillaume sert à dresser et à prolonger les arêtes, et à couper les moulures ;

13° Enfin, d'une série de petits outils en acier, tels que *gouges*, *petits fers*, *grattoirs*, *équerres*, *compas*, *petits guillaumes*, etc., employés pour faire les retours de corniches, les chapiteaux et tous les travaux de moulures, où on ne peut faire glisser le calibre.

## PANS DE BOIS ET CLOISONS.

**365.** *Pans de bois et cloisons.* Dans les localités où la pierre et la brique sont coûteuses, on les remplace par le bois pour les façades de maisons sur les cours, pour les petites ailes de peu d'importance, et surtout pour les murs de refend. Les murs de face sur la rue, et les murs mitoyens, qui contiennent ordinairement les cheminées, doivent être en maçonnerie.

Généralement les cloisons sont construites pour bien distribuer les appartements; elles sont d'un prix modéré et chargent peu les planchers ; celles que l'on emploie le plus à Paris sont :

1° Les cloisons légères en menuiserie à claire-voie, lattées, hourdées et ravalées en plâtre des deux côtés ;

2° Celles en planches jointives, lattées et recouvertes d'un crépi et d'un enduit en plâtre de chaque côté ;

3° Les cloisons en carreaux de plâtre pleins ou creux ;

4° Celles en briques de champ ou de $0^m,055$ d'épaisseur, et celles en briques à plat, ou de $0^m,11$ d'épaisseur, l'une et l'autre rejointoyées ou ravalées en plâtre.

En raison du peu d'épaisseur des pans de bois et de leur faible poids, on conçoit qu'ils n'ont aucune stabilité par eux-mêmes (486), et qu'ils ne se soutiennent que parce qu'ils sont maintenus par les murs, pans de bois ou cloisons en retour, ou encore par les combles et planchers.

Dans les pays où le bois est très-abondant, comme en Russie, les pans de bois sont formés de pièces jointives horizontales qui s'assemblent à mi-bois dans celles qui composent les pans perpendiculaires. On conçoit qu'en raison de la grande quantité de bois qu'entraîne cette disposition, on doit y renoncer dans les pays où le bois a une certaine valeur ; alors on forme les pans de bois et les cloisons avec des poteaux verticaux non jointifs, s'assemblant dans des pièces horizontales.

La disposition la plus généralement adoptée pour les pans de bois et cloisons est celle indiquée fig 6, pl. III, en laissant entre les pièces des vides égaux aux pleins. Quand toute la charpente d'un pan de bois est montée, on remplit les vides avec de la maçonnerie de petits moellons, de briques ou le plus souvent de plâtras (débris, plus ou moins gros, de plafonds, de pans de bois ou de toute autre construction) ; faire ce remplissage s'appelle *hourder*. Pour des constructions de peu d'impor-

tance, les vides laissés entre les pièces de bois sont beaucoup plus grands que les pleins. On fait des cloisons vides, sans hourder; on les construit ainsi quand elles sont en porte-à-faux sur des planchers.

Un pan de bois de trois étages, hourdé plein et ravalé sur les deux faces aurait une épaisseur de $0^m,216$, et une stabilité (poids multiplié par la demi-épaisseur (486)), seulement égale au 1/7 de celle d'un même mur de face en moellons ou en briques, qui devrait avoir $0^m,43$ d'épaisseur.

Ce n'est qu'en reliant les pans de bois aux murs mitoyens, aux pans de bois transversaux et aux planchers, à l'aide de tenons ou harpons en fer, qu'on peut leur donner une stabilité convenable.

Non-seulement les pans de bois sont moins durables que les murs, mais ils sont aussi plus coûteux dans beaucoup de localités.

Les murs sont généralement préférés aux pans de bois toutes les fois que l'espace le permet.

*Noms des différentes pièces qui composent un pan de bois*, fig. 6, pl. III :

*aaa* *sablières*, pièces dans lesquelles toutes les pièces verticales s'assemblent à tenons et mortaises;

*a'a'* *sablières de chambrée;*

*a''* sablière prenant le nom de *poitrail*, quand, comme dans la figure, elle surmonte une large ouverture;

*bb* *poteaux corniers;* ils sont plus forts que les autres;

*ccc* *poteaux d'huisserie.* L'ensemble des poteaux d'huisserie et du *linteau*, pièce horizontale qui couronne une porte ou une croisée, se nomme l'*huisserie* de la porte ou de la croisée;

*ddd* poteaux de *remplage*, c'est-à-dire de remplissage; ils sont ordinairement plus petits que les poteaux d'huisserie et surtout que les poteaux corniers;

*eee* *guettes*, pièce de bois faisant un angle de plus de 60 degrés avec les sablières; on les incline en sens inverse, afin d'obvier aux inconvénients qui résultent du relâchement des assemblages par suite de la dessiccation des bois;

*fff* *décharges*, on nomme ainsi les pièces dont l'inclinaison sur les sablières ne dépasse pas 60 degrés; elles sont destinées non-seulement à obvier au relâchement des assemblages, mais aussi à reporter sur les poteaux d'huisserie le poids des trumeaux qui se trouvent au-dessus d'un grand vide, de manière à soulager le *poitral* qui couronne cette ouverture, ce qui est surtout nécessaire quand le pan de bois porte plancher;

Les guettes et les décharges s'assemblent à *tenons en about* dans les pièces horizontales auxquelles elles aboutissent, c'est-à-dire que les tenons et leurs épaulements sont coupés à peu près en retour d'équerre du côté de l'angle aigu, de manière à ce qu'ils pénètrent à angle droit dans les pièces qui les reçoivent.

Quelquefois, afin de donner plus de solidité aux trumeaux d'encoignure, on remplace les simples guettes ou décharges par des croix de Saint-André, formées par des pièces qui s'assemblent à mi-bois au point où elles se rencontrent, et à tenons en about dans les sablières.

*ggg* *tournisses*, pièces de bois assemblées à tenons et mortaises dans les sablières et dans les guettes ou décharges. Quelquefois on se contente de couper les tournisses obliquement, à la demande des guettes ou décharges, sans faire de tenon; on les arrête seulement avec de grands clous, appelés *dents de*

*loup*, ou avec des chevillettes; afin de ne pas fendre les tournisses, on prépare les trous des clous ou des chevillettes à l'aide d'une vrille;

*hhh* *potelets*, petits poteaux garnissant le dessus des linteaux et le dessous des appuis des croisées;

*iii* bouts des solives des planchers; lorsque les solives sont posées sur des cloisons, elles ne sont pas apparentes sur la façade.

Nous avons donné au n° 486 une règle pour déterminer l'épaisseur d'un pan de bois; cette épaisseur, pour un pan de bois élevé de 3 à 4 étages, est ordinairement de $0^m,20$ à $0^m,25$. Les poteaux corniers ont de $0^m,25$ à $0^m,27$ d'équarrissage; cet équarrissage est le même pour les poteaux formant les pieds-droits d'une grande ouverture, et l'angle des trumeaux dits *d'étriers*. Les sablières ont de $0^m,216$ à $0^m,25$, et les pièces de remplissage, poteaux, tournisses, potelets, guettes, décharges, croix de Saint-André, ont de $0^m,162$ à $0^m,19$.

Un poitrail de devanture de boutique ou de porte cochère doit, lorsqu'il supporte un pan de bois, avoir une dimension verticale égale au 1/12 environ de la largeur de l'ouverture qu'il couronne (225).

Lorsque les cloisons intérieures portent planchers, les poteaux d'aplomb doivent avoir une épaisseur égale au 1/12 de leur hauteur. Les décharges et les sablières ont une largeur et une épaisseur plus fortes de $0^m,027$ environ. Les cloisons de simple séparation n'ayant pas besoin de monter de fond, il suffit que leurs dimensions soient moitié des précédentes; souvent même, afin de les rendre plus légères, au lieu de les hourder pleines, on les laisse creuses, et on pose seulement un enduit sur des lattes clouées l'une à côté de l'autre sur les poteaux. Afin de diminuer les chances de flexion des poteaux de ces cloisons creuses, quand ils ont une certaine hauteur, on les réunit en leur milieu et en d'autres points, si cela est nécessaire, par des liernes horizontales.

Une cloison de séparation doit pouvoir être posée d'une manière quelconque sur le plancher de la pièce que l'on sépare; mais lorsqu'on est obligé de la poser dans le sens de la longueur des solives qui supportent le plancher, afin de soulager la solive qui se trouve en dessous, et qui en supporte le poids, on place des décharges qui reportent une partie de ce poids sur les extrémités de la solive, sinon sur le mur. C'est encore dans le but de soulager la solive travaillante, que l'on met quelquefois dans l'intérieur de la cloison des tirants qui embrassent la solive et vont s'attacher sur les décharges.

Le tableau suivant, extrait du *Traité de l'art de la charpenterie*, par M. Émy, contient les grosseurs que les praticiens donnent le plus communément, au rez-de-chaussée, aux pièces qu'ils emploient dans les pans de bois de $3^m,25$ à $3^m,90$ sous planchers, pour les bâtisses de trois étages. Les pans de bois se montent d'aplomb à l'intérieur; mais à l'extérieur ils ont un fruit de quelques lignes par étage, ce qui diminue en conséquence l'équarrissage des pièces des parties supérieures des pans de bois.

| | | |
|---|---|---|
| PANS DE BOIS DES FAÇADES (de 3m.90). . . . . *Épaisseur.* | 0m.217 à | 0m.244 |
| Poteaux corniers et poteaux de fond. . . *Équarrissage.* | 0 .244 | 0 .271 |
| Poteaux d'étrière. . . . . | 0 .217 | 0 .244 |
| Sablières hautes et basses. . . . . | 0 .217 | 0 .244 |
| Poteaux d'huisserie. . . . . | 0 .189 | 0 .217 |
| Poteaux de remplage. . . . . | 0 .162 | 0 .217 |
| Écartement des poteaux de remplage. . . . . | 0 .271 | 0 .225 |
| Guettes, décharges, croix de Saint-André. . . . . | 0 .162 | 0 .217 |
| Tournisses et potelets. . . . . | 0 .135 | 0 .217 |
| PANS DE BOIS INTÉRIEURS OU cloisons { de 3m.90. . *Épaisseur.* | » | 0 .162 |
| { au-dessus de 3m.90.. . | » | 0 .189 |
| Poteaux { portant plancher. . . . . *Équarrissage.* | 0 .135 | 0 .162 |
| { ne portant pas plancher. . . . . | 0 .108 | 0 .135 |
| CLOISONS DE REFEND OU en porte-à-faux. . . . . | 0 .081 | 0 .135 |

Toutes les pièces qui composent un pan de bois ou une cloison en charpente doivent être assemblées entre elles à tenons et mortaises entrés de force et chevillés.

Afin de garantir les bois de l'humidité, on établit les pans de bois et les cloisons sur des soubassements en moellons ou en pierre de taille, s'élevant au moins à 0m,60 au-dessus du sol.

Une fois la charpente d'un pan de bois établie, on procède au remplissage. Pour cela, on cloue sur une de ses faces des lattes éloignées entre elles de 0m,06 à 0m,11 ; on garnit l'intervalle entre les poteaux de plâtras hourdés grossièrement avec du plâtre, et on place un lattis du côté où le *hourdis* a été fait, comme sur l'autre face. Cette opération faite, après avoir nettoyé la poussière et arrosé le hourdis, on procède au *gobetage*, qui consiste à appliquer du plâtre liquide sur le lattis, avec un balai ou avec la main. Une fois le gobetage sec, on applique le *crépi*, qui se fait avec du plâtre gâché plus serré ; ce crépi se jette à la main et s'étend avec le côté de la truelle, afin que la surface restant raboteuse, l'*enduit* ou troisième couche y adhère mieux.

Le crépi se fait avec du plâtre écrasé passé au panier, au lieu que l'enduit se fait avec du plâtre fin passé au tamis de crin (530).

Afin d'obtenir des surfaces bien planes, on fixe deux règles sur le gobetage, après les avoir plombées avec soin, et au moyen d'une règle mobile qu'on traîne sur les deux règles fixes, qui doivent effleurer l'enduit, on arrive à rendre ce dernier parfaitement plan. L'enduit s'étend avec le dos de la truelle ou la *taloche ;* mais comme, malgré tous les soins que l'on peut prendre, il est impossible d'obtenir une surface plane bien unie, on arrive à ce résultat au moyen de la truelle bretée (562).

On fait quelquefois des cloisons creuses, c'est-à-dire qu'on supprime le hourdis entre les pièces de bois qui forment la charpente ; dans ce cas, le lattis doit être jointif, et on applique successivement dessus, le gobetage, le crépi et l'enduit, comme dans le cas précédent.

## PLANCHERS.

**564.** *Planchers* Ce sont les séparations des étages d'un édifice; ils se composent de trois parties principales : le plafond, la charpente et le carrelage ou parquet.

La fig. 7, pl. III, représente en plan la manière dont on dispose les différentes pièces d'une charpente de plancher.

*aa* *solives.* Leurs extrémités reposent sur des murs, des pans de bois, des cloisons, et quelquefois, dans les anciennes constructions, sur de fortes poutres;

*bb* *solives d'enchevêtrure;* elles peuvent reposer comme les précédentes;

*cc* *solives d'enchevêtrure boiteuses;* une de leurs extrémités repose comme pour les précédentes, mais l'autre est assemblée à tenon et mortaise dans un chevêtre ou un linçoir;

*dd* *chevêtres.* Leurs extrémités sont assemblées dans les solives d'enchevêtrure; quelquefois une seule extrémité est ainsi assemblée, l'autre repose sur le mur. Ils supportent les extrémités des solives de remplissage. On en fait usage non-seulement quand on manque de solives d'une longueur suffisante, mais aussi pour laisser vide l'espace occupé par une cheminée ou un escalier;

*ee* *faux chevêtres.* Ce sont des chevêtres placés derrière d'autres, pour remplir l'espace entre un vrai chevêtre et le mur;

*f* *linçoir.* Pièce de bois dans laquelle on assemble les solives qui correspondent aux fenêtres et portes des murs de face, ou aux tuyaux de cheminées des murs de refend. On appelle aussi *linçoir,* une pièce de peu de longueur, telle que la pièce *g*, qui s'assemble dans un chevêtre à une extrémité, repose sur le mur par l'autre, et qui reçoit l'assemblage d'un faux chevêtre. On appelle encore *linçoir,* la pièce qui reçoit les abouts des chevrons d'une charpente, en face d'une lucarne ou d'un tuyau de cheminée;

*hh* *soliveaux.* Ce sont des petites solives assemblées entre un ou deux chevêtres ou linçoirs, et qui remplissent l'espace libre à côté d'une cheminée ou d'un passage de cheminée;

*ii* *entretoises;*

*k* place d'un âtre;

*k'* passage d'un tuyau de cheminée;

*k''* passage d'un escalier.

**565.** *Ordonnances relatives aux positions que doivent occuper les différentes pièces d'une charpente de plancher par rapport aux âtres des cheminées, aux tuyaux passant des étages inférieurs, et aux vides des portes et croisées des étages inférieurs :*

1° Écarter les solives d'enchevêtrure de $0^m,325$ de plus que le dedans-œuvre des jambages des cheminées de moyenne grandeur, ou, tout au moins, les tenir, de $0^m,027$ de chaque côté plus espacées que le dedans-œuvre des grandes cheminées;

2° Laisser $1^m,14$ de distance depuis le fond du vide de l'âtre jusqu'au devant du chevêtre qui porte les solives de remplissage. S'il y a des tuyaux de cheminées passant derrière l'âtre, la distance de $1^m,14$ se compte à partir du dedans de la languette qui recouvre le contre-cœur;

3° Faire un recouvrement de $0^m,162$ d'épaisseur sur toutes pièces de bois, chevêtres, linçoirs, solives d'enchevêtrure, pour les séparer de l'intérieur des tuyaux de cheminées. Pour soutenir ce recouvrement, on implante dans les pièces de bois des chevilles en fer ou des clous de bateaux;

4° Ne faire en bois aucun manteau de cheminée, ni adosser les tuyaux de cheminées contre des cloisons en charpente ; ne pas poser les âtres sur des solives en bois, et ne placer aucune pièce de bois dans les tuyaux de cheminées ;

5° Éviter surtout de mettre au devant de trois tuyaux passants un linçoir commun, qui aurait peu de solidité à cause de sa trop grande portée ; mettre entre le second et le troisième tuyau une enchevêtrure scellée dans le mur, en ayant soin de laisser, comme il est prescrit, 0m,162 de recouvrement en maçonnerie, de part et d'autre de l'enchevêtrure, jusqu'au dedans-œuvre des tuyaux.

366. *Dimensions des pièces de la charpente des planchers.* Les solives d'enchevêtrure, en raison du poids considérable qu'elles supportent (elles soutiennent non-seulement les jambages et les âtres des cheminées, à l'aide de bandes de fer formant trémie, mais aussi les chevêtres et les linçoirs), doivent être scellées de 0m,22 à 0m,25 dans les murs. Chacune des dimensions transversales de ces solives doit avoir au moins 0m,027 de plus que les solives ordinaires ou de remplissage.

Les tenons des chevêtres et des linçoirs se renforcent en taillant en congé un petit pan incliné dans l'angle rentrant de la face supérieure du tenon, et même, si la longueur de ces pièces atteint 1m,50 à 2 mètres, et qu'elles supportent des solives de remplissage d'une certaine longueur, il convient de soulager leurs tenons à l'aide d'étriers en fer qui passent sous leurs extrémités et viennent se clouer sur les solives d'enchevêtrure. Quand les linçoirs sont placés le long d'un mur, on peut remplacer les étriers par des corbeaux en fer scellés dans le mur.

Au lieu de sceller les solives dans les murs, ce qui a l'inconvénient de diviser ces derniers, on les supporte quelquefois par des pièces de bois appliquées contre les murs, comme l'indique en coupe la figure 8, planche III. Ces pièces, que l'on appelle *lambourdes*, sont scellées par leurs extrémités dans les murs en retour, et soutenues en différents points de leur longueur par des corbeaux en fer fixés dans les murs qu'elles longent. Quand on veut que les lambourdes jouissent d'une plus grande solidité, on les encastre d'environ la moitié de leur largeur dans les murs qu'elles longent. Lorsque l'assemblage des solives aux lambourdes a besoin d'une grande solidité, on le fait à queue d'aronde à recouvrement, en donnant au recouvrement environ le 1/3 de la dimension verticale de la lambourde, et les 2/3 à la queue d'aronde. Suivant la largeur de la lambourde, en divisant cette largeur en quatre parties égales, la partie le long du mur n'est pas entaillée, la queue d'aronde occupe les deux portions du milieu, et l'autre partie porte une entaille de la largeur de la solive. Comme, par ce dernier mode d'assemblage, la lambourde fait saillie au-dessous des solives, on y fixe la corniche du plafond.

La dimension verticale des solives ordinaires étant 1, la même dimension des lambourdes serait 1,5 et leur dimension horizontale 1. Ainsi pour une pièce de 4m,55 dans œuvre, les solives ayant 0m,19 de hauteur, on donnerait aux lambourdes 0m,285 de hauteur sur 0m,19 de largeur.

Lorsque les solives doivent avoir des longueurs trop grandes, on a recours aux poutres. Dans les constructions grossières, on repose simplement les solives sur les poutres, qui alors font saillie de toute leur hauteur sous la face inférieure des solives. Dans le cas où l'on veut établir un plafond et cacher les poutres, on est obligé de placer des petites pièces de remplissage en bois au niveau de la face inférieure des poutres, pour y clouer les lattes du plafond. Afin de diminuer l'épaisseur considérable de plancher qu'entraîne cette disposition, il convient d'appliquer contre chaque face latérale de la poutre une lambourde qui effleure sa face inférieure, et de fixer les solives à ces lambourdes, comme il a été indiqué plus haut pour le cas où les lambourdes sont appliquées contre les murs. Les lambourdes sont scellées dans les murs, et soutenues de distance en distance par des étriers communs aux deux lambourdes et mis à cheval sur la poutre. Quelquefois encore la poutre elle-même fait l'office de lambourde ; mais, afin que ses faces latérales soient inclinées sans enlever le bois, on donne, dans toute la longueur de la pièce de bois, un trait de scie incliné à ses faces supérieure et inférieure, et on place les deux lambourdes qui en résultent l'une à côté de l'autre, en les réunissant par quelques boulons.

On peut encore faire, à l'aide seulement de pièces d'une faible longueur, des planchers d'une grande étendue, en disposant ces pièces de manière qu'elles reposent les unes sur deux murs en des points voisins d'un angle, les autres sur un mur par une extrémité et sur une pièce par l'autre, et les autres sur une pièce par chaque extrémité. On conçoit que ces charpentes demandent à être faites avec beaucoup de soin, et que le système reposant sur quelques tenons, on peut considérer la solidité comme problématique si l'on ne met pas un étrier en fer à chaque tenon.

D'après Rondelet, on doit donner à chaque solive des planchers de maisons d'habitation 1/24 de leur longueur quand elles sont espacées tant vide que plein, et plus quand l'écartement augmente. La largeur des solives ne doit pas être moindre que la moitié de la hauteur (220), à moins qu'on ne place des fourrures ou des liernes pour les empêcher de gauchir. Quant aux poutres, il conseille de leur donner pour équarrissage 1/18 de leur portée quand elles sont espacées de 3 mètres à 3m,50, ce qui se rapproche assez des dimensions que donnerait la formule $\frac{pL^2}{8} = \frac{Rbh^2}{6}$ du n° 225, dans laquelle $p$, charge par mètre de longueur de la pièce, serait calculé à raison de 200 kilogrammes par mètre carré de surface (une poutre peut même se trouver momentanément chargée d'un poids supérieur quand il y a un grand nombre de personnes en mouvement dans la pièce qu'elle supporte, n° 568); $R = 600\,000$ (n° 220), et $b = h$, car les poutres ont ordinairement une section transversale carrée, afin de ne pas les affaiblir en coupant les fibres pour les rendre méplates.

*Le tableau suivant donne les Dimensions des poutres et des solives de planchers d'après* Bullet, *et rapportées par* M. Emy *comme étant en usage dans les bâtisses ordinaires.*

| POUTRES. | | | SOLIVES DE BRIN. | | | SOLIVES DE SCIAGE. | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Long. | Équarrissage. | | Long. | Équarrissage. | Écart. | Longueur. | Équarrissage. | | Écart. |
| m. | m. | m. | | | | | | | |
| 3.90 | 0.27 sur | 0.32 | | | | | | | |
| 4.87 | 0.30 | 0.36 | | | | | | | |
| 5.85 | 0.33 | 0.40 | | | | | | | |
| 6.82 | 0.35 | 0.44 | de | | | m. | m. | m. | |
| 7.80 | 0.37 | 0.48 | m. | | | 4.87 | 0.16 sur | 0.22 | |
| 8.77 | 0.41 | 0.51 | 2.92 à | m. | m. | 5.85 | 0.22 | 0.25 | |
| 9.75 | 0.43 | 0.56 | m. | 0.14 sur | 0.19 | m. | m. | | m. |
| 10.72 | 0.46 | 0.59 | 4 87 | | | 7.80 à 8.12 | 0.24 | 0.27 | 0.22 |
| 11.70 | 0.49 | 0.62 | | | | m. | | | |
| 12.68 | 0.51 | 0.65 | | | | 8.77 | 0.27 | 0.30 | |
| 13.64 | 0.54 | 0.68 | | | | | | | |

Tredgold donne la formule suivante pour calculer les dimensions des solives et des poutres :

$$h = \mathrm{K}\sqrt[3]{\frac{l^2}{b}}.$$

$h$ hauteur de la pièce en mètres ;
$b$ largeur *id.* *id.* ;
$l$ portée de la pièce *id.* ;
K coefficient qui prend les valeurs suivantes :

1° *Pour les planchers simples*, à un seul rang de solives, sans que $b$ puisse être inférieur à $0^m,05$, $\mathrm{K} = 0,0363$ si les solives sont en sapin, et $\mathrm{K} = 0,0376$ si elles sont en chêne ;

2° *Pour les planchers assemblés*, les poutres principales, sans que leur écartement excède 3 mètres, exigent que l'on fasse $\mathrm{K} = 0,0688$ ou 0,0711, suivant qu'elles sont en sapin ou en chêne.

Pour les petites poutres transversales assemblées aux poutres principales, distantes au plus de $1^m,30$ à 2 mètres, $\mathrm{K} = 0,0560$ pour le sapin et $\mathrm{K} = 0,0578$ pour le chêne.

Les dimensions des solives supérieures se règlent comme au 1°.

Enfin pour les solives inférieures qui ne servent qu'à fixer les lattes, sans prendre $b$ supérieur à $0^m,05$, on fait $\mathrm{K} = 0,0104$ ou 0,0109, suivant que l'on emploie le sapin ou le chêne.

Aujourd'hui les solives s'espacent de $0^m,33$ environ d'axe en axe, et on fait à peu près $h = 2b$ (tableau page 770). Des charpentiers de Paris font même $h = 3b$, avec espacement de $0^m,30$ d'axe en axe.

Pour les poitrails de boutiques (563), on est dans l'usage de refendre en deux les pièces de bois qui servent à les former, d'en écarter les

deux parties de $0^m,05$ à $0^m,06$ par des fourrures, et de les relier par des boulons. L'augmentation de largeur que l'on donne ainsi aux poitrails fait qu'il est plus facile d'y reposer les murs ; de plus, le bois refendu perd facilement son humidité naturelle, qu'il aurait conservée en partie sans cette précaution, ce qui en aurait accéléré la pourriture.

Il y a encore un cas où l'on refend une poutre : c'est celui où, ne disposant pas de bois d'une assez forte dimension, on est obligé d'avoir recours aux poutres armées. Dans ce cas on refend la pièce de bois et on en écarte les deux parties, entre lesquelles on place deux pièces de bois qui forment un triangle isocèle dont la poutre est la base. La hauteur de ce triangle est faible, afin que le dessus des armatures ne dépasse pas le haut des lambourdes sur lesquelles reposent l'aire en plâtre et le parquet. Un boulon allant du sommet du triangle au milieu de sa base rend tout le système solidaire et lui donne une grande rigidité.

Pour les édifices tels que les magasins à blés, entrepôts, etc., il est impossible de donner une règle empirique pour déterminer les dimensions des poutres, solives et autres pièces des planchers ; on est obligé d'avoir recours aux formules relatives à la résistance des matériaux (n^os^ 220 et suivants).

*Poutres et solives nervées en bois.*

Quand on emploie des bois ou des fers méplats pour résister à des pressions transversales, on a intérêt à adopter l'épaisseur $b$ la moindre possible, par rapport à la hauteur $h$, puisque c'est celle dont le moment d'inertie $\frac{1}{12} b h^3$ est le plus grand possible pour des sections $bh$, $b'h'$, équivalentes (220). Si les tôles sont trop minces, elles se voilent, si les bois sont trop méplats, ils se plissent.

Pour les constructions en bois, la hauteur $h$ est donnée par la section $h^2$ d'équarrissage des poutres livrées au commerce ; s'il s'agit d'un plancher, la somme des largeurs $\Sigma b = B$ des poutres d'une portée L est donnée par la formule (225).

$$\frac{PL^2}{8} = R \frac{Bh^2}{6}.$$

P pression par mètre courant de portée du plancher pour toute sa largeur ; si le plancher a 10 mètres de largeur, et qu'il doive résister à une pression de 280 kilog. par mètre carré, P sera égal à 2800 kilog. (568).

B étant obtenu, on a un grand intérêt à diviser cette largeur en un plus grand nombre possible de poutrelles d'une épaisseur $b$, afin de diminuer la partie des pièces du parquet, et celle du lattis du plafond ; ainsi il est très-important de savoir à quelle limite de grande sécurité on doit s'arrêter dans la détermination du rapport de $\frac{b}{h}$. Dans la pratique, pour les solives, on fait $\frac{b}{h} = \frac{1}{2}$ environ.

Partant de ces considérations, M. Lagout, ingénieur des ponts et chaussées, a cherché à concilier le principe avantageux des bois méplats avec la règle précédente, en clouant sur la moitié supérieure des faces latérales des bois méplats, des nervures économiques, de manière à donner à la face supérieure de la pièce armée, une largeur égale à la moitié de la hauteur, et à doubler ainsi, à peu de frais, la résistance du bois méplat.

*Croûtes ou dosses de scieries utilisées en nervures.*

M. Lagout ayant soumis des bois méplats à des pressions transversales croissantes, il a observé que l'altération du bois se produisait d'abord dans la zone supérieure ou de compression des fibres, sans que la limite d'élasticité fût atteinte dans la zone inférieure ou de traction des fibres, et il a été ainsi conduit à consolider la partie supérieure par des demi-croûtes ou matières encombrantes des scieries clouées le long de la pièce en forme de nervures, dont la plus grande section est au milieu de la poutre, ce qui lui donne en plan la forme d'un solide d'égale résistance qui a une hauteur uniforme (232).

L'épaisseur uniforme $b$ de l'ame est égale au sixième de la hauteur $h$ de la poutre et la plus grande largeur de chaque nervure, au milieu de la longueur de la poutre, est aussi égale à $b$; d'où il résulte qu'en ce point la largeur totale de la base supérieure est égale à $3b = \frac{1}{2}h$.

*Cambrure.* De plus, avant de l'armer de ses nervures, la pièce est cambrée en son milieu sous une flèche égale aux $\frac{4}{1000}$ de la portée L.

*La pièce de bois méplat ainsi préparée présente trois avantages :*

1° La résistance de la pièce nervée est double environ de la pièce non nervée, ce qui présente une économie de 50 p. 100 du bois du commerce;

2° Le prix de revient est augmenté d'un tiers, ce qui équivaut à une économie en argent de 33 p. 100;

3° La cambrure disparaissait à l'œil sous la flexion produite par la charge utile. Résultat important, puisque la flexion trop grande des pièces primitivement droites oblige souvent les constructeurs à augmenter la section pour diminuer la flèche.

*Règles pratiques pour les ouvriers.*

1° Débitez en 6 madriers les bois équarris;

2° Placez le madrier de champ sur un établi, fixez les extrémités, enfoncez une cale au milieu pour le soulever de $\frac{4}{1000}$ L, en ayant soin de mettre une plaque de fer entre la cale et la pièce de bois;

3° Fixez de chaque côté les demi-croûtes arrasées à la partie supérieure par deux rangs de clous disposés de manière que les clous d'un rang se croisent avec ceux de l'autre; dans chaque rang, les clous sont espacés de 0m,30. De plus, entre les bouts des deux parties de dosses qui composent chaque nervure, enfoncez une cale ou clef en bois, qui se trouve au milieu de la longueur de la poutre.

L'entr'axe des poutres ainsi nervées peut être égal à celui qui con-

viendrait à des poutres rectangulaires d'une épaisseur *double* de celle du bois méplat.

567. *Pose du carrelage ou parquet et du plafond.* Pour terminer le plancher, si on laisse les solives apparentes, ce que l'on peut faire dans un atelier par exemple, on place dessus des recoupes de débris de bois appelées *bardeaux*, ou, pour plus d'économie, des lattes jointives. Sur ces bardeaux ou sur ce lattis on place une couche de plâtre de $0^m,04$ à $0^m,05$ d'épaisseur, qu'on laisse se raffermir; puis on applique en dessous, entre les solives, une deuxième couche de plâtre, qui peut être moins épaisse que la couche supérieure sur laquelle on pose le carrelage; ces plafonds partiels inférieurs s'appellent *entrevous*.

Cette disposition ne peut convenir pour des lieux habités. Dans ce cas, on fait les planchers pleins ou creux. Pour les premiers, qui transmettent peu le bruit d'un étage à un autre, on commence par fixer un lattis sous les solives; sur ce lattis, on fait, comme pour les pans de bois (563), un hourdis que l'on élève jusqu'au niveau de la face supérieure des solives, et sur la surface qui en résulte on étend une couche de plâtre sur laquelle on établit le carrelage. Sous le lattis on fait un gobetage, puis un crépi, en appliquant le plâtre à l'aide de la taloche, et enfin l'enduit plus ou moins soigné qui doit terminer le plafond, dont l'épaisseur ne dépasse pas $0^m,03$.

Au lieu d'un hourdis qui remplit complétement les vides laissés entre les solives, on se contente quelquefois, après avoir fixé le lattis inférieur, de placer dessus, entre les solives, une couche plus ou moins épaisse de plâtre. Ces couches de plâtre, séparées entre elles par les solives, sont ce que l'on appelle des *augets;* on en rend la surface concave afin d'augmenter leur surface de contact avec les solives, et des petits clous de peu de valeur, que l'on nomme *rappointis*, implantés dans les solives à l'endroit des augets, augmentent l'adhérence de ceux-ci avec les solives. Ces augets ajoutent considérablement à la solidité des plafonds, qui, sans cela, sont sujets à se fendiller et à se détacher du lattis. Une fois les augets terminés, on établit un lattis tant plein que vide sur les solives, et sur ce lattis on étale une couche de plâtre de $0^m,04$ à $0^m,05$ d'épaisseur pour y reposer le carrelage.

Quant on ne craint pas que le bruit d'un étage se fasse trop entendre à l'étage inférieur, on fait le plancher creux, c'est-à-dire qu'on supprime le hourdis et les augets entre les solives. Les lattis inférieur et supérieur sont tant plein que vide ; sous le premier on établit le plafond, et sur le second la couche de plâtre sur laquelle repose le carrelage.

Quand au lieu d'un carrelage on veut établir un parquet, si les solives sont toutes de niveau à leur partie supérieure, on peut faire reposer directement le parquet sur les solives, mais généralement on établit une couche de plâtre de $0^m,04$ sur le lattis supérieur; sur cette couche

de plâtre on place des *lambourdes*, pièces de bois de $0^m,067$ de hauteur sur $0^m,05$ de largeur, et c'est sur ces lambourdes que l'on repose le parquet. On peut remplir les vides entre les lambourdes avec une matière sèche. Quelquefois on repose directement les lambourdes sur le lattis, et on se contente de les relier par des augets en plâtre reposant sur le lattis.

**368.** *Planchers en fer.*

Depuis quelques années, on substitue très-souvent le fer au bois dans la construction des planchers; on peut presque dire que c'est ce que l'on fait exclusivement aujourd'hui à Paris.

Les solives sont en fer double T; on les espace de $0^m,80$ à 1 mètre; elles sont engagées de $0^m,20$ à $0^m,25$ dans les murs et y sont retenues par des harpons et ancres; leur hauteur est ordinairement comprise entre le 1/30 et le 1/35 de leur longueur, et on leur donne environ 1/200 de flèche avant la pose. Les solives sont reliées entre elles par des entretoises en fer carré qui s'agrafent dans les murs et sur les solives; quelfois les entretoises sont en fer rond et boulonnées; dans tous les cas elles sont perpendiculaires aux solives, et espacées entre elles de $0^m,80$ à $0^m,90$. Sur les entretoises, parallèlement aux solives, on accroche des *fantons*, petites tringles en fer carré de $0^m,010$ à $0^m,011$ de côté, qui se recourbent à angle droit pour descendre au niveau de la face inférieure des solives. Les fantons sont espacés de $0^m,25$ environ, et c'est sur le treillage qu'ils forment que l'on exécute le hourdis, soit en plâtras secs, soit en briques creuses, soit en poterie; ces deux dernières matières ont l'avantage de donner des planchers secs, légers, résistants, et communiquant peu le bruit d'un étage à l'autre.

Le plafond s'exécute sans lattes sous le hourdis. Si le plancher est plein, on peut poser le carrelage dessus directement; dans le cas contraire, on le pose sur une aire en plâtre faite sur un lattis reposant sur les solives. Les parquets peuvent se poser directement sur le hourdis; mais ordinairement on les fixe sur des lambourdes.

Les dimensions des solives se calculent à l'aide de la formule du n° 225 relative à une pièce reposant sur deux appuis et chargée uniformément sur toute sa longueur :

$$\frac{pL^3}{8} = \frac{RI}{n}.$$

$p$ charge par mètre de longueur de la pièce, $p$ comprend le poids du plancher (page 770), et la surcharge, qui peut être accidentellement de 4 personnes ou de 280 kilog. par mètre carré de plancher. La pratique semble avoir confirmé qu'en prenant en moyenne 280 kilog. pour la charge totale par mètre carré, ce qui correspond à une surcharge d'une personne par mètre carré, on obtient une résistance suffisante; cela est dû à l'augmentation de rigidité produite par la liaison des différentes pièces par le hourdis, et aux encastrements dans les murs;

R, que l'on peut faire égal à 6 000 000, L, $n$ et I ont les significations du n° 220.

*TABLEAU des dimensions des profils des différents fers en double* T, *à angles arrondis, des usines de la Providence et de Montataire; des poids par mètre courant de ces fers, et des valeurs de* $\frac{I}{n}$ *calculées par M. Morin. Les nervures étant les mêmes, on a* $n=\frac{h}{2}$.

| DÉSIGNATION. | VALEUR DE (*fig.* 49) | | | | POIDS par mètre. | VALEUR DE $\frac{I}{n}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $h$ | $h'$ | $b$ | $b-b'$ | | |
| | m. | m. | m. | m. | k. | |
| Providence. . . . . | 0.100 | 0.088 | 0.043 | 0.005 | 9.00 | 0.000 028 50 |
| | | | 0.045 | 0.007 | 12.00 | 0.000 031 84 |
| Montataire. . . . . | 0.100 | 0.085 | 0.042 | 0.010 | 8.06 | 0.000 037 25 |
| | | | 0.047 | 0.015 | 11.56 | 0.000 045 60 |
| Providence . . . . . | 0.120 | 0.106 | 0.045 | 0.004 | 11.00 | 0.000 040 18 |
| | | | 0.050 | 0.009 | 15.00 | 0.000 052 18 |
| Montataire . . . . . | 0.120 | 0.104 | 0.047 | 0.005 | 10.00 | 0.000 045 54 |
| | | | 0.050 | 0.010 | 14.28 | 0.000 057 54 |
| Providence . . . . . | 0.140 | 0.126 | 0.047 | 0.006 | 14.00 | 0.000 055 90 |
| | | | 0 053 | 0.012 | 20.00 | 0.000 075 46 |
| Montataire . . . . . | 0.140 | 0.123 | 0.050 | 0.007 | 13.00 | 0.000 078 03 |
| | | | 0.055 | 0.012 | 18.00 | 0.000 084 54 |
| Providence . . . . . | 0.160 | 0.144 | 0.048 | 0.007 | 15.00 | 0.000 077 27 |
| | | | 0 053 | 0.012 | 25.00 | 0.000 098 60 |
| Montataire . . . . . | 0.160 | 0.142 | 0.055 | 0.007 | 16 50 | 0.000 115 19 |
| | | | 0.062 | 0.014 | 25.00 | 0.000 130 31 |
| Providence . . . . . | 0.180 | 0.162 | 0.055 | 0.008 | 20 00 | 0.000 111 98 |
| | | | 0.062 | 0.015 | 30.00 | 0.000 149 78 |
| Montataire . . . . . | 0.180 | 0.162 | 0 060 | 0.008 | 20.00 | 0.000 119 25 |
| | | | 0.067 | 0.015 | 30.00 | 0.000 157 09 |
| Montataire . . . . . | 0.200 | 0.181 | 0.065 | 0.008 | 22.00 | 0.000 151 67 |
| | | | 0.073 | 0.016 | 34.40 | 0.000 205 00 |
| Providence . . . . . | 0.220 | 0.200 | 0.064 | 0.009 | 26.00 | 0.000 182 24 |
| | | | 0.071 | 0.016 | 40.00 | 0.000 238 71 |
| Montataire . . . . . | 0.220 | 0.201 | 0.065 | 0.008 | 24.30 | 0.000 173 66 |
| | | | 0 073 | 0.016 | 37.40 | 0.000 238 20 |
| Providence . . . . . | 0.260 | 0.236 | 0.067 | 0.013 | 40.00 | 0.000 299 74 |
| | | | 0 074 | 0.020 | 58.00 | 0.000 378 60 |

Pour des solives espacées de $0^m,80$, c'est-à-dire pour $p = 280 \times 0,80 = 224$ kilog., si la portée $L = 5^m,00$, la formule précédente donne

$$\frac{I}{n} = \frac{224 \times 25}{8 \times 6\,000\,000} = 0,000\,116\,67.$$

Ce qui indique que le fer de Montataire dont $h = 0^m,16$ et pesant $16^k,50$ le mètre pourra être employé.

M. Moitié, de Coulommiers, architecte, à l'occasion de constructions qu'il a fait établir rue de Valois et rue de Grenelle Saint-Germain, a fait une étude comparative des planchers en bois avec les planchers en fer; les tableaux suivants contiennent les résultats qu'il a obtenus, et qu'il a bien voulu nous communiquer. (Dans ces tableaux, les poids sont exprimés en kilogrammes, les dimensions en mètres et les prix en francs.)

1° *Planchers en bois de 10m.50 de largeur, établis avec 4 enchevêtrures, 10 chevêtres et 28 solives de remplissage; avec étriers, harpons, ancres, chevêtres en fer et bandes de trémie, et dont le hourdis est maintenu par des clous à bateaux et rappointis.*

| DÉTAILS. | Portée du plancher. | 3.00 | 3.50 | 4.00 | 4.50 | 5.00 | 5.50 | 6.00 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Surface du plancher | | 31.50 | 36.75 | 42.00 | 47.25 | 52.50 | 57.75 | 63.00 |
| Enchevêtrures. | Longueur | 3.50 | 4.00 | 4.50 | 5.00 | 5.50 | 6.00 | 6.50 |
| | Section | 0.20×0.20 | 0.21×0.21 | 0.22×0.21 | 0.24×0.22 | 0.25×0.24 | 0.27×0.25 | 0.32×0.30 |
| | Volumes des 4. | 0.560 | 0.706 | 0.832 | 1.104 | 1.254 | 1.610 | 2.496 |
| Chevêtres. | Longueur totale | 21.35 | 21.30 | 21.20 | 21.05 | 20.90 | 20.75 | 20.85 |
| | Section | 0.20×0.18 | 0.21×0.19 | 0.22×0.20 | 0.22×0.22 | 0.25×0.22 | 0.25×0.24 | 0.30×0.25 |
| | Volume des 10. | 0.769 | 0.859 | 0.933 | 1.065 | 1.149 | 1.245 | 1.574 |
| Solives. | Longueur | 1.75 | 2.25 | 2.75 | 3.25 | 3.40 | 4.25 | 4.45 |
| | Section | 0.15×0.08 | 0.16×0.08 | 0.17×0.08 | 0.19×0.08 | 0.20×0.09 | 0.23×0.10 | 0.25×0.12 |
| | Volume des 28. | 0.588 | 0.806 | 1.047 | 1.383 | 1.710 | 2.737 | 3.492 |
| Cube total de bois | | 1.917 | 2.370 | 2.812 | 3.552 | 4.113 | 5.592 | 7.945[a] |
| *Id.* par mètre superficiel de plancher | | 0.0608 | 0.0645 | 0.0693 | 0.0751 | 0.0814 | 0.0960 | 0.126 |
| Prix du stère de bois | | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 110.00 |
| Prix, par mètre carré de plancher, | du bois | 6.08 | 6.45 | 6.93 | 7.51 | 8.14 | 9.60 | 13.86 |
| | des ferrements | 1.25 | 1.30 | 1.40 | 1.45 | 1.50 | 1.60 | 2.25 |
| | du plafond en plâtre sur lattis espacé de 0m.40, avec augets et aire en plâtre sur bardeaux | 4.50 | 4.50 | 4.50 | 4.50 | 4.50 | 4.50 | 4.50 |
| | Total, non compris le parquet | 11.83 | 12.25 | 12.83 | 13.46 | 14.14 | 15.70 | 20.61 |
| Poids du mètre carré, | *id.* | 158.00 | 163.00 | 167.00 | 174.00 | 180.00 | 187.00 | 224.00 |
| Épaisseur du plancher, | *id.* | 0.25 | 0.25 | 0.27 | 0.28 | 0.30 | 0.30 | 0.35 |

[a] Dans ce cube est compris celui 0m.383 d'un cours de moises de 0m.45 sur 0m.25 de section, et de 10m.20 de longueur.

2° *Planchers en fer de 1 0m.50 de largeur, établis avec solives à double* T, *entretoises et fantons; avec harpons et ancres, et hourdis fait plein à augets de 0m.10 d'épaisseur en plâtras secs et sains et plâtre, avec plafond enduit dessous.*

| DÉTAILS. | Portée du plancher. | 3.00 | 3.50 | 4.00 | 4.50 | 5.00 | 5.50 | 6.00 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Surface du plancher | | 31.50 | 36.75 | 42.00 | 47.25 | 52.50 | 57.75 | 63.00 |
| Solives. | Espacement | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.75 | 0.75 |
| | Nombre | 12. | 12. | 12. | 12. | 12. | 13. | 13. |
| | Longueur | 3.40 | 3.90 | 4.40 | 4.90 | 5.40 | 5.90 | 6.50 |
| | Hauteur | 0.12 | 0.12 | 0.12 | 0.14 | 0.14 | 0.16 | 0.16 |
| | Poids par mètre | 12.00 | 13.00 | 14.00 | 15.00 | 16.00 | 20.00 | 25.00 |
| | Poids total | 489.60 | 608 40 | 728.00 | 882.00 | 1036.80 | 1534.00 | 2212.00 |
| Entretoises. | Espacement | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.80 | 0.75 |
| | Nombre | 42. | 52. | 52. | 65. | 65. | 84. | 112. |
| | Longueur développée | 1.20 | 1.20 | 1.20 | 1.20 | 1.20 | 1.25 | 1.25 |
| | Côté de la section, qui est carrée | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.014 |
| | Poids par mètre | 1.52 | 1.52 | 1.52 | 1.52 | 1.52 | 1.52 | 1.52 |
| | Poids total | 76.61 | 94.45 | 94.45 | 118.56 | 118.56 | 146.84 | 212.80 |
| 26 cours de fantons (*a*). | Longueur, y compris scellements et agrafes | 3,50 | 4.00 | 4.50 | 5.00 | 5.50 | 6.00 | 6.30 |
| | Côté de la section, qui est carrée | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| | Poids du mètre courant | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 | 0.77 |
| | Poids total | 70.07 | 80.08 | 90.08 | 100.10 | 109.50 | 129.36 | 203.74 |
| Poids des 8 harpons fixés avec boulons, et des 8 ancres de 0m.80 de longueur en fer carré de 0m.03 de côté | | 68.80 | 68.80 | 68.80 | 68.80 | 68.80 | 68.80 | 80.00 |
| Poids total de fer | | 705.08 | 851.73 | 981.33 | 1169.46 | 1333.66 | 1879.00 | 2708.54 |
| Poids de fer par mètre carré de plancher | | 22.383 | 23.258 | 23.364 | 24.75 | 26.409 | 32.536 | 42.91 |
| Prix par mètre carré de plancher | du fer, à raison de 50 fr. les 100 kilog. | 11.19 | 11.63 | 11.68 | 12.38 | 13.20 | 16.27 | 21.45 |
| | du hourdis à augets de 0m.10 d'épaisseur. | 1.50 | 1.50 | 1.50 | 1.50 | 1.50 | 1.50 | 1.60 |
| | de l'enduit du plafond en plâtre | 2 00 | 2.00 | 2.00 | 2 00 | 2.00 | 2.00 | 2.00 |
| | total, non compris le parquet | 14.69 | 15.13 | 15.18 | 15.88 | 16.75 | 19.77 | 25.05 |
| Poids du mètre carré, | *id.* | 189.00 | 192.00 | 193.00 | 196.00 | 196.00 | 198.00 | 211.00 |
| Épaisseur du plancher, | *id.* | 0.14 | 0.14 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.18 |

(*a*) Dans les planchers de 6 mètres de portée, il y a 42 cours de fantons; et comme les entretoises ont été espacées de 0m.75 au lieu de 0m.80, comme cela a lieu ordinairement, il en résulte que chacune des 14 travées formées par les solives contient 8 entretoises.

*Devis du plancher de 6 mètres de portée établi d'après le système de M. Rosier.*

| | |
|---|---|
| 13 solives en fer, semblables à celles du tableau précédent, 2 212k,50, à 0f,50 le kilog. | 1106f,25 |
| 9 cours de boulons en fer de 0m,014 de diamètre, et de 10m,80 de longueur, y compris scellements aux extrémités, avec écrous simples et doubles; le tout 97m,20, à 1k,25 le mètre, pèse 121k,50, à 0f,75 le kilog. | 91 ,12 |
| 15 cours de soliveaux en chêne de sciage, dressés sur toutes faces, de chacun 10m,00 × 0,05 × 0,16, cubent 1st.,200, à 130f,00 le stère. | 156 ,00 |
| 30 cours de tasseaux pour porter le bardeau, ensemble 300m,00, à 0f,25. | 75 ,00 |
| Le bardeau compris entre les solives, 2/3 de la surface, c'est-à-dire 42m,65, à 0f,80 le mètre. | 34 ,12 |
| Le plafond sur lattis espacés de 0m,10 avec augets au-dessus, produisent 63m,00, à 3f,00 le mètre. | 189 ,00 |
| L'aire au-dessus, faite en plâtre, de 0m,04 d'épaisseur, même surface, à 0f,75 le mètre. | 47 ,25 |
| Total. | 1698f,74 |
| Prix du mètre carré de plancher, sans parquet. | 26 ,70 |
| Poids *id.* *id.* | 145k,00 |
| Épaisseur du plancher *id.* | 0m,18 |

*Devis du même plancher de 6m,00 de portée et 63m,00 de surface hourdé en poterie, et construit avec des fermettes espacées de 0m,75 et composées d'un arc et d'une corde en fer plat ou rond, avec brides et entretoises.*

Détail d'une ferme :

| | |
|---|---|
| Arc en fer de 0m,068 × 0m,014 × 6m,25. | » |
| Corde *id.* de 0m,054 × 0m,014 × 6m,50. | » |
| 7 brides *id.* de 0m,054 × 0m,011 × 3m,50. | » |
| Cales et fourrures 0m,054 × 0m,014 × 0m,60. | » |
| Poids total d'une ferme. | 103k,36 |
| Poids des 13 fermes. | 1343k,68 |
| A 68f,00 les 100 kilog. | 913f,70 |
| Pour chacune des 14 travées, 6 entretoises contre-coudées à double agrafe, fer de 0m,030 × 0,009 × 1m,45, ensemble 8m,70, à 2k,10 le mètre, 18k,27. | |
| Pour les 14, 255k,78, à 55f,00 les 100 kilog. | 140f,68 |
| 8 ancres en fer de 0,030 × 0,030 × 0,80, ensemble 6m,40, à 7 kilog. le mètre, 44k,80. | |
| — à 50 fr. les 100 kilog. | 22 ,40 |
| 3 cours de fantons, en fer carré de 0m,011 de côté, dans chaque travée. Pour les 14 travées, 42 fantons pesant 250k,83, à 40 fr. les 100 kilog. | 100 ,33 |
| 62 mètres superficiels de poterie, de 0m,22 de hauteur, hourdée en plâtre, à 12f,60 le mètre. | 781 ,20 |
| Crépis et enduits du plafond, cintrage, etc., à 2 fr. le mètre. | 126 ,00 |
| Prix total du plafond, sans parquet. | 2084f,31 |
| Prix du mètre carré, sans parquet. | 33 ,08 |
| Poids du mètre carré, sans parquet. | 142k |
| Épaisseur du plancher. | 0m,28 |

## ENDUITS.

369. *Enduits.* Dans les intérieurs, les enduits se font en plâtre comme les plafonds (567). Les enduits en mortier se posent à la truelle, et on les dresse avec une taloche de $0^m,15$ sur $0^m,20$. Les enduits en ciment romain se posent à la truelle et se dressent avec le tranchant de cet outil. Lorsque les enduits sont apparents, après la taloche ou la truelle, on passe la truelle bretée pour terminer la surface (562).

L'application des enduits en mortier hydraulique se fait principalement sur l'extrados des voûtes et sur les murs de soubassement, afin de préserver la maçonnerie de l'humidité et des infiltrations d'eau; on recouvre également de ces enduits tous les murs et radiers de réservoirs, de citernes, de fosses, d'aqueducs, etc.

Les mortiers préférables pour l'exécution de ces enduits sont ceux de chaux hydraulique, et surtout ceux de ciment romain; la prompte solidification de ces derniers à l'air et dans l'eau, et leur degré d'imperméabilité, leur donnent une supériorité incontestable sur tous les autres, surtout lorsqu'il s'agit de résister à la pression d'un liquide (540).

Lorsque l'enduit doit être appliqué sur une maçonnerie neuve hourdée en mortier de chaux, si les parements sont assez bruts pour présenter des aspérités suffisantes pour retenir l'enduit, l'ouvrier commence par dégrader légèrement les joints si l'enduit est en mortier de chaux, et très-profondément s'il est en mortier de ciment, afin qu'on puisse tous les garnir d'un rocaillage, surtout si la maçonnerie est en moellons. Ce dégradage fait, l'ouvrier brosse et mouille les parements pour augmenter l'adhérence de l'enduit.

S'il s'agit au contraire d'une vieille construction dont les parements sont trop unis et couverts de matières nuisibles à l'adhérence du mortier, ou d'une maçonnerie hourdée en plâtre ou en mortier de terre, on dégrade d'abord les joints profondément et carrément, puis on pique à la pioche les matériaux, afin de priver les parements de toutes les parties altérées et y pratiquer des aspérités. Cela fait, on nettoie parfaitement les parements en les frottant d'abord à sec avec des balais très-durs, et en les lavant ensuite à l'eau au moyen de brosses ou de balais, jusqu'à ce qu'ils soient entièrement dépourvus de poussière, qui aurait diminué l'adhérence de l'enduit.

Pour les parements supérieurs horizontaux, comme lorsqu'il s'agit de radiers, le nettoyage offre plus de difficultés; l'ouvrier éprouve beaucoup de peine pour retirer avec la brosse et la pointe de la truelle tous les détritus qui se logent dans les petites cavités provenant du dégradage. Cependant, le soulèvement des enduits de radiers provenant presque toujours de leur défaut d'adhérence avec la maçonnerie, défaut

dû ordinairement aux détritus non enlevés, on conçoit l'importance d'un nettoyage parfait.

On nettoie très-bien les parements lorsqu'il y a possibilité de projeter de l'eau dessus avec une pompe foulante, par sa grande vitesse, l'eau détache et entraîne la poussière, les matières terreuses et les parcelles de mortier et de pierre ébranlées lors du dégradage.

Le dégradage et le lavage des parements étant terminés, on commence par remplir les plus grands joints d'un rocaillage, puis on procède à la pose de l'enduit (*Art.* 477).

370. *Rejointoiement.* Il s'opère en creusant les joints avec un crochet jusqu'à une profondeur de 2 à 3 centimètres, en les nettoyant avec soin au moyen d'une brosse dure ou d'un balai, en les arrosant au besoin, et en les remplissant de mortier que l'on presse bien avec la truelle.

La surface vue des joints peut être plate et effleurer le nu du parement; c'est ce que l'on fait pour les pierres tendres, afin de préserver les arêtes, et aussi pour les briques. Ces joints plats se lissent souvent avec une tige recourbée en fer, appelée *tire-joints*, que l'on fait glisser le long d'une règle.

Les maçonneries de moellons bruts ou smillés se font quelquefois à joints plats, ou encore à joints arrondis en creux, mais le plus souvent on les fait en boudin. Les joints de cette dernière forme, qui conviennent surtout pour les pierres de taille dures, résistent mieux aux actions de la pluie et de la gelée, et le dégagement des arêtes de la pierre donne de plus aux parements un aspect de solidité et de beauté parfaitement en harmonie avec cette espèce de maçonnerie.

371. *Corniches en plâtre et moulures de lambris.* Pour faire une corniche en plâtre, on commence par former à la place qu'elle doit occuper une masse de plâtre dont la saillie soit un peu moindre que celle de la corniche, des rappointis assurent la fixité de cette masse; puis on fixe une règle bien droite contre le mur, au bas de la corniche et parallèlement à cette corniche. Cela fait, on applique une couche convenable de plâtre clair contre la masse solide, et c'est avec cette couche de plâtre mou que l'on fait les moulures de la corniche, en passant dessus, à plusieurs reprises, un calibre en tôle ou en bois dont le pourtour est taillé suivant les formes des moulures. Afin que ce calibre soit bien guidé pendant la traîne de la corniche, on le fixe par une entaille sur le milieu d'une règle qui porte un angle rentrant. Un bâton oblique, dont une extrémité se fixe dans le calibre et l'autre dans la règle, donne une certaine solidité à leur ensemble. Par cette disposition, en faisant glisser le calibre sur la couche de plâtre, de manière que l'angle rentrant de sa règle suive bien l'angle saillant de la règle fixée contre le mur, on est sûr d'obtenir une corniche bien droite (*Art.* 315).

On suit une marche semblable pour faire les moulures des lambris.

372. *Blanc en bourre.* Quand on n'a pas de plâtre, on fait usage,

pour les plafonds et enduits, de *blanc en bourre*, mortier de terre argileuse et de 1/5 à 1/6 de chaux grasse, auquel on a mélangé de la bourre.

Il faut éviter d'employer le blanc en bourre pendant les temps de gelée.

La chaux doit être éteinte depuis plusieurs mois, afin que l'on soit sûr qu'aucune particule n'a échappé à l'extinction; sans quoi, après la confection de l'enduit, le poli s'altérerait.

**373.** *Stucs.* On fait souvent usage d'un marbre artificiel appelé stuc. On distingue :

1° Le *stuc en chaux*, obtenu en mélangeant en parties égales de la chaux et du marbre en poudre tamisé; on le pose en couche mince, sur une première couche en plâtre mélangé à un mortier de chaux et de sable fin.

2° Le *stuc en plâtre*, qui n'est autre chose que du plâtre bien pur gâché avec une eau dans laquelle on a fait fondre de la colle de Flandre.

Le stuc en plâtre ne peut s'employer qu'à l'intérieur; mais celui à la chaux peut s'appliquer à l'extérieur, en ayant soin de faire l'ébauche ou les premières couches entièrement en mortier de chaux hydraulique.

Si l'on veut donner au stuc en plâtre un aspect de marbre veiné, on incruste dans la masse des veines faites avec du plâtre gâché colorié à l'aide de la couleur que l'on veut obtenir (*Art.*).

## COMBLES.

**374.** *Combles.* C'est la construction que l'on fait pour préserver de la pluie les parties intérieures d'un édifice.

Quelquefois un comble est assez peu incliné pour qu'on puisse y marcher assez facilement; il prend alors le nom de *terrasse*.

Ordinairement un toit est formé de deux pans inclinés en sens contraire et se raccordant suivant une arête qui prend le nom de *faîte*.

Dans les édifices plus longs que larges, le faîte est parallèle à la longueur, et chacun des plans dont se compose le toit prend le nom de *long-pan*. Quand les longs-pans du toit se terminent aux murs latéraux de l'édifice, ces murs prennent le nom de *pignons*. Si le toit se termine par des portions de toit qui s'appuient sur les longs-pans et sur les murs latéraux, ces pans inclinés s'appellent *croupes*. Quand l'édifice est carré, les longs-pans et les croupes sont égaux et viennent se terminer à un sommet commun; on a alors un toit en *pavillon*.

Quand on veut faire des logements dans les combles, les pans du toit sont formés de deux parties; l'une inférieure se rapprochant beaucoup de la verticale et dans laquelle on pratique les fenêtres des appartements, et une partie supérieure, plus inclinée et s'appuyant sur la première et sur le faîte. Ce sont les combles à la *mansarde*.

Quelquefois le comble est composé d'une seule pente, et prend le nom d'*appentis*, nom qui s'étend à tout l'édifice, si cet édifice reste

ouvert, ou si le comble n'est soutenu que par des poteaux ou des pilastres. Le faîte d'un appentis est généralement adossé à un des murs d'un édifice plus élevé.

**375.** *Fermes.* Comme les matériaux employés pour la couverture sont en petits échantillons et très-minces, pour les soutenir, on construit, tous les trois à quatre mètres, des assemblages solides, appelés *fermes*, dirigés suivant la largeur de l'édifice. Ces fermes sont quelquefois en maçonnerie, plus souvent en fer ou en fer et fonte, ou encore en fer et bois, mais ordinairement elles sont en bois.

On doit toujours placer les fermes à l'aplomb des trumeaux, c'est-à-dire des parties pleines qui séparent les portes et croisées de l'édifice.

**376.** *Noms des différentes pièces qui entrent dans la composition d'une ferme.*

Figure 9, planche III.

*a* *entrait ou tirant.* Pièce recevant les assemblages des arbalétriers, et celui du poinçon quand il n'y a pas d'entrait retroussé;

*b* *entrait retroussé.* Il reçoit l'assemblage du poinçon et empêche les arbalétriers de fléchir sous leur charge;

*c* *arbalétrier;*

*d* *poinçon;*

*e* *contre-fiche;*

*ff* *jambettes;*

*g* *aisselier;*

*h* *faîte;*

*h'* *lien de faîte.* Petite jambe de force empêchant tout mouvement du poinçon par rapport au faîte;

*h''* *tierne.* Pièce destinée à relier les fermes entre elles;

*ii* *pannes.* Leur distance varie de 2 mètres à 2m,30; la panne qui se trouve à l'angle de deux parties qui composent un même pan de toit à la mansarde prend le nom de *panne de brisis;*

*kk* *tasseaux.* Quelquefois, entre le tasseau et la panne, on place un coussinet en bois, qui prend le nom de tasseau; alors, le tasseau prend le nom de *chantignole;*

*l* *sablière;*

*m* *blochet;*

*n* *chevrons.* Pièces de 9 à 11 centimètres d'équarrissage, éloignées entre elles de 0m,40 à 0m,45, et supportant la volige ou le lattis sur lequel on pose la couverture proprement dite;

*o* *coyau.*

On appelle *chanlate* une pièce de bois dont la section est un triangle rectangle, qu'on place au pied des chevrons pour recevoir un égout pendant.

**377.** *Dimensions des différentes pièces d'une ferme.* C'est toujours avec le plus grand soin qu'un ingénieur doit étudier les fermes des combles. Par une heureuse disposition, il peut réduire les dimensions des pièces qui les composent, et par suite en diminuer le prix et le poids, tout en obtenant une rigidité plus grande, ce qui n'ajoute pas peu à la solidité des murs (n° 486, page 650).

*TABLEAU des équarrissages, en centimètres, des différentes pièces qui composent les fermes de diverses formes et de différentes portées* (extrait du *Cours de construction de l'école de Metz*). La disposition 27/24, par exemple, indique que la section de la pièce a 27 centimètres pour la dimension perpendiculaire à la dimension horizontale, et 24 centimètres pour cette dernière.

| DÉSIGNATION DES FERMES. | Largeur du bâtiment dans œuvre. | Tirant ne portant pas de plancher. | Le tirant portant un plancher. | Entrait retroussé. | Jambes de force. | Arbalétriers. | Poinçon. | Contrefiches et Jambettes. | Aisseliers. | Faîte. | Liens de faîte. | Pannes, tasseaux et chantignoles. | Liernes. | Sablières. | Blochets. | Chevrons. | Coyaux. | Chanlate. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Ferme simple | 6m | 27/24 | 32/27 | » | » | 22/19 | 19/19 | 16/16 | » | 19/16 | 15/15 | 19/19 | » | 12/23 | » | 9/9 | 8/7 | 16/3 |
| | 9 | 33/30 | 40/32 | » | » | 26/24 | 24/24 | 19/19 | » | 20/17 | 16/16 | 20/20 | » | 14/25 | » | 10/10 | 9/8 | 18/4 |
| | 12 | 40/36 | 47/37 | » | » | 32/30 | 30/30 | 21/21 | » | 22/19 | 17/17 | 22/22 | » | 16/28 | » | 11/11 | 10/9 | 20/5 |
| Ferme à entrait retroussé, et arbalétrier allant du faîte au tirant | 6 | » | 42/30 | 21/19 | » | 22/19 | 19/19 | 15/15 | 19/15 | 19/16 | 15/15 | 19/19 | » | 12/23 | » | 9/9 | 8/7 | 18/3 |
| | 9 | » | 52/30 | 27/24 | » | 26/24 | 24/24 | 18/18 | 24/18 | 20/17 | 16/16 | 20/20 | » | 14/25 | » | 10/10 | 9/8 | 19/4 |
| | 12 | » | 63/45 | 33/30 | » | 32/30 | 30/30 | 22/22 | 30/22 | 22/19 | 17/17 | 22/22 | » | 16/28 | » | 11/11 | 10/9 | 20/5 |
| Ferme avec entrait retroussé et jambe de force | 6 | » | 42/30 | 21/19 | 24/19 | 18/15 | 15/15 | 14/14 | 19/15 | 19/16 | 15/15 | 19/19 | 19/19 | 12/23 | 18/14 | 9/9 | 8/7 | 16/3 |
| | 9 | » | 52/37 | 27/24 | 29/24 | 22/18 | 18/18 | 16/16 | 24/18 | 20/17 | 16/16 | 20/20 | 20/20 | 14/25 | 20/15 | 10/10 | 9/8 | 18/4 |
| | 12 | » | 63/45 | 33/30 | 35/30 | 27/22 | 22/22 | 18/18 | 30/22 | 22/19 | 17/17 | 22/22 | 22/22 | 16/28 | 22/16 | 11/11 | 10/9 | 20/5 |
| Ferme pour comble à la mansarde | 6 | » | 42/30 | 23/20 | 22/20 | 20/18 | 18/18 | 14/14 | 20/13 | 19/16 | 15/15 | 19/19 | 20/20 | 12/23 | 18/14 | 9/9 | 8/7 | 16/3 |
| | 9 | » | 52/37 | 30/27 | 29/27 | 25/23 | 23/23 | 16/16 | 27/18 | 20/17 | 16/16 | 20/20 | 21/21 | 14/25 | 20/15 | 10/10 | 9/8 | 18/4 |
| | 12 | » | 63/45 | 36/33 | 34/33 | 30/28 | 28/28 | 18/18 | 33/22 | 22/19 | 17/17 | 22/22 | 23/23 | 16/28 | 22/16 | 11/11 | 10/9 | 20/5 |

Avec le chêne et le sapin, qu'on emploie généralement, il ne convient pas d'augmenter les dimensions consignées au tableau précédent, et en soignant bien les assemblages et en disposant convenablement les pièces on peut les diminuer.

Pour un appentis, les dimensions des différentes pièces seraient à peu près les mêmes que pour une ferme complète d'une portée double. La figure 10, planche III, indique une disposition à adopter.

Dans les dispositions de fermes dont il vient d'être question, on est obligé d'avoir recours à un tirant pour contre-buter la poussée des arbalétriers sur les murs, poussée qui est d'autant plus grande que le toit est plus surbaissé et que sa portée est plus grande. Comme il y a des circonstances où l'entrait qui traverse l'édifice dans toute sa largeur serait embarrassant, on fait alors quelquefois usage du système de charpente publié par Philibert Delorme en 1561. Dans ce système, il n'y a pas de ferme proprement dite, ou plutôt chaque chevron est une espèce de ferme circulaire formée par deux cours de bouts de planches placés de champ l'un à côté de l'autre, de manière que les joints de chaque cours correspondent au milieu des bouts qui composent l'autre cours. Des liernes en bois qui traversent les fermes au milieu de leur largeur servent, par le moyen d'une clavette en bois placée sur chaque face de la ferme et traversant les liernes, à relier toutes les fermes entre elles. Ces clavettes ont aussi l'avantage de joindre entre eux les deux cours de bouts de planches qui forment chaque ferme, ce que l'on fait encore par des chevilles en bois de chêne de $0^m,01$ à $0^m,02$ de diamètre, ou, ce qui est plus facile, par des clous d'épingles. On a soin de placer une lierne à l'extrémité de chaque bout de planche, et de manière que moitié de sa hauteur se trouve entaillée dans un bout, et l'autre moitié dans le bout en contact, afin de joindre les deux bouts d'un même cours comme par un tenon. Les bouts de planches ont de $1^m,30$ à $1^m,40$ de longueur, et d'après Philibert Delorme leur section transversale doit être de

| m. | | m. | | m. |
|---|---|---|---|---|
| 0,216 | sur | 0,027 | pour une portée de | 8,00 |
| 0,27 | | 0,04 | *id.* | 11,50 |
| 0,35 | | 0,054 | *id.* | 19,50 |
| 0,35 | | 0,067 | *id.* | 29,00 |

L'écartement des fermes est de $0^m,65$ environ d'axe en axe.

Le côté intérieur des planches reste droit, mais celui extérieur s'arrondit légèrement afin que l'ensemble fasse un arc continu.

Pour établir ces combles, on forme au-dessus et à l'intérieur des murs une retraite dans laquelle on établit une sablière en bois de $0^m,22$ à $0^m,25$ d'épaisseur sur une largeur égale à celle des planches. On tient la surface supérieure de cette sablière un peu au-dessous du haut de la corniche, et on y pratique des mortaises pour recevoir des tenons faits

dans les bouts des fermes. Des coyaux en planches raccordent les fermes avec la saillie de la corniche. Une fois les fermes posées, on place dessus des planches que l'on y fixe et que l'on relie entre elles. Ces planches peuvent, au besoin, dispenser d'employer les liernes dont il a été question ; mais alors on doit réunir les cours de bouts de planches de chaque ferme avec des pointes ou des chevilles de $0^m,02$ ; les chevilles présentant une plus grande surface que les pointes, elles se prêtent moins au glissement des deux cours l'un sur l'autre.

Plusieurs constructeurs et ingénieurs sont arrivés depuis quelques années à supprimer le tirant au moyen de fermes curvilignes de toutes portées, composées de planches ou de madriers équarris disposés de différentes manières (578).

**578.** *Calcul des dimensions des différentes pièces d'une ferme.* En étudiant avec attention de quelle manière les efforts se transmettent sur les différentes pièces d'une charpente, on peut calculer très-approximativement les dimensions qu'il convient de leur donner. Pour prendre une idée de ce genre de calcul, considérons :

1° Une ferme composée seulement de deux arbalétriers et d'un entrait, figure 11, planche III. Soit :

N la réaction horizontale de chacun des arbalétriers sur l'extrémité de l'autre ;
P le poids de chaque arbalétrier et de sa charge ; P est réparti uniformément sur toute la longueur de l'arbalétrier ;
$l$ la demi-portée de la ferme ;
$m$ la hauteur de la ferme ;
$L = \sqrt{l^2 + m^2}$ la longueur de l'arbalétrier ;
$a$ l'angle que font les arbalétriers avec l'entrait.

Il faut d'abord, pour que le système se maintienne en équilibre, que, pour chaque arbalétrier, les forces P et N, qui tendent à les faire tourner autour des points A ou C, se fassent équilibre autour de ces points, et que l'on ait par conséquent (*Int.* 1407 et suiv.)

$$N \times m = P \times \frac{l}{2}, \quad \text{d'où} \quad N = P\,\frac{l}{2m}.$$

L'arbalétrier AB est sollicité par compression, dans le sens de la longueur de ses fibres, par la résultante Q des deux forces N et $\frac{P}{2}$ appliquées au point B. On a (*Int.* 1360)

$$Q : \frac{P}{2} = L : m, \quad \text{d'où} \quad Q = P\,\frac{L}{2m}.$$

Ayant Q, à l'aide de ce qui a été dit n° 218, on déterminera les dimensions à donner à l'arbalétrier AB pour résister à cette force.

L'arbalétrier AB doit aussi résister à la composante $P\cos a = P\,\frac{l}{L}$

du poids P, normale à l'arbalétrier et répartie uniformément sur toute sa longueur.

On aura donc, d'après ce qui a été dit n° 225,

$$\mathrm{P}\frac{l}{\mathrm{L}}\times\frac{\mathrm{L}}{8}=\frac{\mathrm{R}bh^2}{6},\quad \text{d'où}\quad bh^2=\frac{3\mathrm{P}l}{4\mathrm{R}}.$$

$b$, $h$ et R ont les mêmes significations qu'au n° 220.

Nous avons vu (220) qu'il convenait de faire varier R entre 550 000 et 750 000. Faisant R = 700 000, cette valeur substituée dans l'équation précédente donne

$$bh^2=0{,}000\,001\,07\ \mathrm{P}l.$$

M. Ardant pose (*Mémoire sur les combles*)

$$bh^2=\mathrm{P}(0{,}000\,001\,11\ h+0{,}000\,001\,07\ l).$$

Formule qui ne diffère de la précédente que par le terme en $h$, que M. Ardant introduit pour tenir compte de la compression due à la force qui agit dans le sens des fibres, et que l'on peut négliger près de celui en $l$.

La valeur précédente de R convient pour les charpentes ordinaires; mais pour des bois secs et bien équarris à vives arêtes on peut faire R = 800 000, et même R = 1 000 000 si le bois est de choix.

L'entrait doit résister par traction à l'effort $\mathrm{T}=\mathrm{N}=\mathrm{P}\frac{l}{2m}$ qui lui est transmis par les arbalétriers dans le sens de sa longueur; on doit donc avoir

$$\mathrm{P}\frac{l}{2m}=bh\times 600\,000,\quad \text{d'où}\quad bh=0{,}000\,000\,833\ \mathrm{P}\frac{l}{m}.$$

600 000 nombre de kilogrammes que peut supporter le chêne par mètre carré de section (216).

L'entrait tend à se rompre par flexion sous son propre poids; on doit donc avoir, pour qu'il résiste à cet effort, en appelant $\delta$ le poids du mètre cube de bois, et en remarquant que le poids est réparti uniformément sur toute la longueur (225),

$$\frac{\delta bh\times 4l^2}{8}=\frac{\mathrm{R}bh^2}{6},\quad \text{d'où}\quad bh=\frac{3\delta bl^2}{\mathrm{R}}.$$

Faisant R = 700 000, on a

$$bh=0{,}000\,004\,29\delta bl^2.$$

Ajoutant cette valeur à la précédente, afin que l'on soit sûr que la section de l'entrait sera suffisante pour résister simultanément aux efforts de traction et de flexion, on aura en définitive

$$bh = 0{,}000\,000\,833\ \mathrm{P}\,\frac{l}{m} + 0{,}000\,004\,29\delta bl^2.$$

Quand le tirant est en fer, il doit en outre résister au retrait résultant de la diminution de température. Or le fer se contractant de 0,000 0122 de sa longueur par degré centigrade de refroidissement (259), comme il faut 12 205 000 kilog. pour allonger une pièce de fer de 1 mètre carré de section des 0,000 66 de sa longueur primitive (216), il en résulte que, pour chaque degré centigrade de diminution de température, un tirant dont la section est A produira sur chacune de ses extrémités, en tendant à se raccourcir, une traction égale à

$$\mathrm{A}\,\frac{0{,}000\,0122}{0{,}000\,66} \times 12\,205\,000 = \mathrm{A} \times 225\,608 \text{ kilog.},$$

et si la température passe de $t$ à $t'$, la traction du tirant sera

$$\mathrm{A} \times 225\,608\ (t - t').$$

Supposant que le fer employé résiste à un effort permanent de 10 000 000 kilog. par mètre carré de section (216), on devra donc avoir, pour que le tirant résiste à la poussée $\mathrm{N} = \mathrm{P}\,\frac{l}{2m}$ des arbalétriers et à l'effet de la contraction,

$$10\,000\,000 \times \mathrm{A} = \mathrm{P}\,\frac{l}{2m} + \mathrm{A} \times 225\,608\ (t - t');$$

d'où l'on tire

$$\mathrm{A} = \frac{\mathrm{P}\,\frac{l}{2m}}{10\,000\,000 - 225\,608\,(t - t')}.$$

2° Pour une ferme à tirant et faux entrait, telle que l'indique la fig. 12, pl. III, on calculera les dimensions à donner à la partie supérieure AB de l'arbalétrier de la même manière que dans le cas précédent, c'est-à-dire comme si la partie ABC reposait sur des murs en B et C. Quant à la partie inférieure BD, on la calculera pour résister par flexion à la composante, normale à sa direction, de la charge comprise entre B et D (1°), et pour résister par compression suivant ses fibres, à une force que l'on déterminera de cette manière : la moitié du poids de la partie supérieure ABC est portée par le point B; de plus, le poids de la portion BD se décompose en deux parties égales, l'une appliquée au point D et qui repose directement sur le mur, l'autre appliquée au point B et qui s'ajoute à la moitié du poids de la partie supérieure ABC pour produire une charge verticale $p$. Le point B est sollicité non-seulement par $p$, mais aussi par la réaction du faux entrait, et comme il y a équilibre,

ces deux forces donnent une résultante BF dirigée suivant BD, et à laquelle cette pièce devra résister par compression. De la proportion

$$\mathrm{BF} : \mathrm{B}p = p :: \mathrm{L} : m, \quad \text{on conclut} \quad \mathrm{BF} = p\,\frac{\mathrm{L}}{m}.$$

Ayant la composante BF, on calculera les dimensions de BD d'après ce qui a été dit n° 218.

Le faux entrait ne résiste que quand AD fléchit; mais il convient de le calculer pour résister par compression à la composante BG. Remarquant que l'on a $\mathrm{BG} = p\mathrm{F}$, il en résulte que l'on peut poser

$$\mathrm{BG} : \mathrm{B}p = p :: l : m, \quad \text{d'où} \quad \mathrm{BG} = p\,\frac{l}{m}.$$

Ayant BG, on calculera les dimensions du faux entrait CB, d'après ce qui a été dit n° 218.

Quant au tirant, le faux entrait agissant par compression, on doit le calculer comme si cette pièce n'existait pas (1°).

3° *Pour un comble retroussé*, fig. 13. pl. III, il est évident que si l'arbalétrier doit se briser, ce sera au point B; c'est donc pour ce point qu'il faut calculer les dimensions à lui donner. Or remarquons que la réaction verticale DP du mur, sous l'extrémité de l'arbalétrier, est égale au poids total P du pan AD, et que P se décompose en deux forces, l'une DF dirigée suivant DB pour comprimer cette pièce dans le sens de la longueur de ses fibres, et l'autre DE perpendiculaire à BD, qui agit avec un bras de levier $\mathrm{BD} = \mathrm{L}'$ pour rompre cette pièce en B; les triangles semblables DEP et ADK donnent

$$\mathrm{DE} : \mathrm{DP} = \mathrm{P} :: l : \mathrm{L}, \quad \text{d'où} \quad \mathrm{DE} = \mathrm{P}\,\frac{l}{\mathrm{L}}.$$

On calculera alors les dimensions à donner à l'arbalétrier au point B, à l'aide de la formule

$$\mathrm{P}\,\frac{l\mathrm{L}'}{\mathrm{L}} = \frac{\mathrm{R}bh^2}{6}, \quad \text{d'où} \quad bh^2 = \frac{6\mathrm{P}l\mathrm{L}'}{\mathrm{RL}}. \qquad (220)$$

Faisant $\mathrm{R} = 600\,000$, cette formule devient

$$bh^2 = 0{,}000\,01\,\frac{\mathrm{P}l\mathrm{L}'}{\mathrm{L}}.$$

La force verticale P, appliquée au point D, tend à faire tourner l'arbalétrier autour du point A avec le bras de levier $l$; la traction T de l'entrait CB s'oppose à ce mouvement avec un bras de levier $m'$, et comme la charge P s'oppose aussi à ce mouvement avec le bras de levier $\frac{l}{2}$, puisqu'il y a équilibre entre ces trois forces, on a

$$\mathrm{P}l = \mathrm{T}m' + \frac{\mathrm{P}l}{2}, \quad \text{d'où} \quad \mathrm{T} = \frac{\mathrm{P}l}{2m'}.$$

Ayant T, on déterminera les dimensions à donner à CB, d'après ce qui a été dit ci-dessus (1°) (216).

4° *Pour des combles retroussés supportés par des poteaux réunis aux arbalétriers par des aisseliers*, fig. 14, pl. III, M. Ardant donne les formules suivantes pour calculer les dimensions des arbalétriers et des poteaux.

| INCLINAISON DU TOIT. | ARBALÉTRIERS. | POTEAUX. |
|---|---|---|
| 2 de base pour 1 de haut. | $bh^2 = 0.000\,001\,04\,Pl$ | $bh^2 = 0.000\,002\,26\,Pl$ |
| 3 2 | $bh^2 = 0.000\,001\,04\,Pl$ | $bh^2 = 0.000\,002\,02\,Pl$ |
| 1 1 | $bh^2 = 0.000\,001\,05\,Pl$ | $bh^2 = 0.000\,001\,63\,Pl$ |

Ces formules, dans lesquelles P est le poids d'un des pans du toit et $l$ la demi-ouverture, ont été données par des fermes formant des polygones circonscrits à des cercles.

Pour les constructions exécutées avec beaucoup de soin et avec des bois de choix, d'après M. Ardant, au lieu de faire travailler les charpentes au 1/10 de la charge qui produirait la rupture, ce que supposent les formules, on peut les charger jusqu'au 1/6 environ ; ce qui revient à multiplier par 6/10 les coefficients numériques de ces formules (page 780).

5° Pour de plus grandes portées, les fermes précédentes se composent comme l'indiquent les fig. 82 et 83.

Fig. 82.

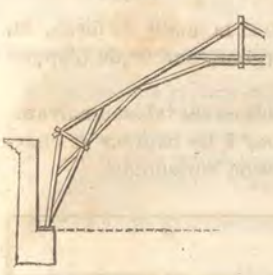
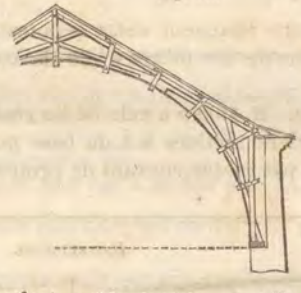


Fig. 83.



Pour ces dispositions, on fait encore usage des formules du tableau précédent, mais en partageant l'épaisseur trouvée pour l'arbalétrier, entre cette pièce et le renfort qui la double, et celle trouvée pour le poteau, entre l'ensemble formé par cette pièce et la jambe de force, en donnant à celle-ci la largeur du poteau.

Application de ces règles, faite par M. Ardant aux fermes du manége de Pont-à-Mousson. On a

$2l = 18$ mètres ;
Inclinaison du toit, 27° à l'horizon ou 63° avec la verticale ;
Longueur de l'arbalétrier, $10^m,75$ ;
Écartement des fermes, $3^m,50$.

*Poids de la couverture par mètre carré.*

| | |
|---|---|
| 1° 50 tuiles courbes de Lorraine, mouillées. . . . . | 90 kilog. |
| 2° Un mètre carré de plancher de $0^m,027$ d'épaisseur, avec clous. . . . . | 19 |
| 3° Deux mètres courants de chevrons de $0^m,10$ sur $0^m,10$. . . . . | 14 |
| | 123 |
| Poids porté par une demi-ferme, $10,75 \times 3,50 \times 123 =$. . . . . | 4628 |
| Cube approximatif d'une demi-ferme, $2^m,50$; poids, $2,50 \times 600 =$ . . . | 1500 |
| Poids des pannes et liernes, évalué à. . . . . | 600 |
| Total. . . . . | 6728 kilog. |

Soit $P = 7\,000$ kilog.

L'équarrissage de l'arbalétrier est alors donné par la formule

$$bh^2 = 0,000\,001\,04 \times 7\,000 \times 9 = 0,065\,52.$$

On a fait $b = 0^m,20$, et l'on tire $h = 0^m,572$.

On a adopté $h = 0^m,58$.

Pour le poteau, on a

$$bh^2 = 0,000\,002\,26 \times 7\,000 \times 9 = 0,142\,38.$$

On a fait $b = 0^m,40$, partagé entre les deux moises qui forment le poteau, et l'on a déduit

$$h = 0^m,596, \quad \text{soit} \quad h = 0^m,60.$$

On a partagé cette épaisseur entre le poteau et la jambe de force, en donnant à chacune de ces pièces $0^m,20$ de largeur, sur $0^m,30$ d'épaisseur.

En opérant ainsi, M. Morin a calculé les résultats du tableau suivant, pour des arbalétriers inclinés à 3 de base pour 2 de hauteur et chargés de 400 kilog. par mètre courant de projection horizontale.

| PORTÉE de la ferme. | ÉQUARRISSAGE. | | | |
|---|---|---|---|---|
| | de l'arbalétrier. | des sous-arbalétriers et aisseliers. | de chacune des moises des poteaux. | de la jambe de force. |
| m. | m. m. | m. m. | m. m. | m. m. |
| 24 | 0.20 et 0.25 | 0.20 et 0.20 | 0.125 et 0.25 | 0.20 et 0.25 |
| 22 | 0.20 et 0.22 | 0.20 et 0.20 | 0.125 et 0.22 | 0.20 et 0.25 |
| 20 | 0.20 et 0.20 | 0.20 et 0.20 | 0.125 et 0.20 | 0.20 et 0.25 |
| 18 | 0.15 et 0.20 | 0.15 et 0.20 | 0.125 et 0.18 | 0.15 et 0.15 |
| 16 | 0.15 et 0.18 | 0.15 et 0.15 | 0.120 et 0.16 | 0.15 et 0.15 |
| 14 | 0.15 et 0.15 | 0.15 et 0.15 | 0.120 et 0.15 | 0.15 et 0.15 |

6° Les fermes du système de M. Émy sont composées d'une ferme de pièces droites, comme les précédentes, reliée par des moises pendantes à une ferme intérieure en arc de cercle formée de madriers posés à plat l'un sur l'autre. Des expériences de M. Ardant sur ce genre de fermes, il résulte que la ferme droite porte à peu près les 2/3 du poids du toit, et que l'arc porte l'autre tiers. Il conviendra donc de calculer les dimensions de la ferme droite à l'aide des formules précédentes (4°), dans lesquelles on fera P égal aux 2/3 du poids du pan de toit qui repose sur la ferme.

Quant aux dimensions de l'arc, on se servira des formules suivantes, dues à M. Ardant, et qui sont aussi applicables à des arcs simples, c'est-à-dire non accompagnés de fermes droites.

| MODE de répartition de la charge. | POUSSÉE au niveau des naissances. | ABAISSEMENT du sommet ou du point de suspension de la charge. | ÉQUARRISSAGE, EN MÈTRES, DES ARCS | |
|---|---|---|---|---|
| | | | dont la section est rectangulaire. | dont la section est circulaire. |
| Uniformément sur la circonférence. . . . | 0.16P | $0.051\frac{Pl^3}{Ebh^3}$ | $bh^2=\frac{P}{R}(0.599h+0.27l)$ | $r^3=\frac{P}{R}(0.424r+0.062l)$ |
| Uniformément par rapport à l'horizontale. | 0.22P | $0.084\frac{Pl^3}{Ebh^3}$ | $bh^2=\frac{P}{R}(0.680h+0.25l)$ | $r^3=\frac{P}{R}(0.200r+0.044l)$ |
| Suspendue au sommet. | 0.32P | $0.222\frac{Pl^3}{Ebh^3}$ | $bh^2=\frac{P}{R}(0.597h+0.55l)$ | $r^3=\frac{P}{R}(0.200r+0.212l)$ |
| Suspendue au-dessus du milieu du rayon. | 0.28P | $0.173\frac{Pl^3}{Ebh^3}$ | | |

P poids porté par l'arc entier ; c'est alors le 1/3 du poids total du toit supporté par la ferme du système de M. Émy ;

$l$ rayon moyen de l'arc ;

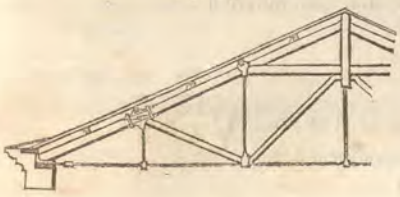
$r$ rayon de la section transversale de l'arc ;

R coefficient qu'il convient de faire égal à 300 000 pour les arcs en pièces de bois (220) ;

E coefficient qu'il convient de faire égal à 500 000 000 pour le bois (220).

Les formules précédentes sont encore applicables aux arcs en fer fondu ou forgé ; mais alors $R = 5\,000\,000$ et $E = 1\,200\,000\,000$.

Fig. 84.



7° Pour les grandes fermes antiques ou à la Palladio, en charpente, avec tirant et aiguilles pendantes en fer également espacées, fig. 84, les dimensions des différentes pièces se calculent à l'aide des formules suivantes :

Arbalétrier supérieur $bh^2 = P'(0.000\,001\,11h + 0.000\,001\,07\,l')$;
Arbalétrier inférieur $bh^2 = P''(0.000\,002\,57h + 0.000\,001\,07\,l'')$;

Entrait en bois $bh = 0.000\,000\,9\,P''\frac{l}{f} + 0.000\,001\,07\,db{l'}_1^2$;

Tirant en bois ne portant pas plancher $bh = 0.000\,000\,9\,P\frac{l}{f} + 0.000\,000\,11\,db{l_1}^2$;

Tirant en fer ne portant pas plancher $bh = 0.000\,000\,1\,P\frac{l}{f} + 0.000\,000\,11\,db{l_1}^2$;

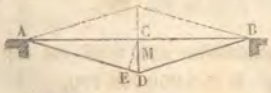
P charge totale de l'arbalétrier, qui est composé de deux, l'un allant du faîte à l'entrait en bois, et l'autre allant de cet entrait au tirant;
P′ et P″ charges respectives des arbalétriers supérieur et inférieur;
$b$ dimension horizontale de la section des pièces, et $h$ dimension perpendiculaire à $b$;
$2l$ portée totale de la charpente;
$f$ montée ou hauteur du faîte au-dessus du tirant;
$l'$ et $l''$ longueurs respectives des projections horizontales des deux parties de l'arbalétrier, $l' + l'' = l$;
$d$ densité de la matière dont le tirant est composé;
$l_1$ longueur de tirant comprise entre deux aiguilles consécutives;
$l'_1$ longueur d'entrait comprise entre le poinçon et l'arbalétrier.

Nous avons vu dans les examens précédents que les poinçons et les tirants agissent par traction. Il convient donc, afin de diminuer la dépense et le poids du toit, de les construire en fer; c'est ce que l'on fait souvent.

Les arbalétriers et les faux entraits agissant par flexion et par compression, on les fait le plus généralement en bois.

**379.** *Charpentes en fer.* Ce système de charpentes tendant à se répandre de jour en jour, quoique la détermination des efforts que supportent les différentes pièces qui les composent soit très-simple, puisqu'elle revient à la décomposition ou à la composition des efforts extérieurs, ce qui peut se faire, soit géométriquement, soit par le calcul, nous allons cependant exposer la marche à suivre dans les cas qui peuvent se présenter. Il est évident que, suivant les localités, on pourra faire usage simultanément du fer, du bois et de la fonte.

Fig. 85.




1° *Pièce* AB *reposant sur deux appuis, soutenue en son milieu par un poinçon* CD *reposant sur un tirant* ADB, *et chargée d'un poids* P *uniformément réparti sur toute sa longueur, ce qui revient à une charge* $\frac{P}{2}$ *appliquée au milieu* C (fig. 85). Soient :

L la distance AB des points d'appui;
M la longueur CD du poinçon;
N la longueur de chacun des tirants AD et DB; $N = \sqrt{\frac{L^2}{4} + M^2}$;
Q l'effort de compression suivant la longueur de CD;
T la tension de chacun des tirants;

Si l'on suppose que le point C ne s'abaisse pas sous la charge, on a

$$Q = \frac{P}{2}. \qquad (218)$$

Le point D étant en équilibre sous l'action des tensions T des tirants AD et DB et de la charge Q du tirant, on a

$$T : Q = N : 2M, \quad \text{d'où} \quad T = Q\frac{N}{2M} = P\frac{N}{4M}. \qquad (216)$$

Chacune des parties AC et BC résiste par compression à la résultante Q′ de la portion de charge $\frac{P}{4}$ de l'appui A et de la tension T, et on a

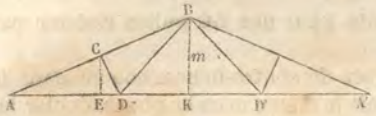
$$Q' = \frac{PL}{8M}. \qquad (218)$$

Dans la pratique on ne doit pas supposer que le point C ne s'abaisse pas ; car avant de mettre la charge ou en l'enlevant, la réaction des tirants ferait fléchir la pièce de bas en haut avec un effort Q appliqué au milieu C. Pour diminuer autant que possible la flexion absolue, on fait fléchir la pièce de haut en bas de manière à lui faire supporter directement la moitié $\frac{P}{4}$ de la charge appliquée au point C, et on a alors

$$Q = \frac{P}{4}, \quad T = Q\frac{N}{2M} = P\frac{N}{8M} \quad \text{et} \quad \frac{PL}{16} = \frac{RI}{n}. \qquad (225)$$

2° *Charpente à grande portée avec tirants et contre-fiches* (fig. 86).

Fig. 86.




Soient :

L la longueur de l'arbalétrier AB ; $L = \sqrt{l^2 + m^2}$ ;
$l$ la demi-portée AK de la ferme ;
M la longueur de la contre-fiche CD ;
N la longueur de chacun des tirants AD et DB ;
$m$ la montée BK du toit ;
$a$ l'angle des arbalétriers avec l'horizon ;
Q l'effort de compression de CD ;
T, T′ et T″ les tensions respectives des tirants DD′, AD et DB ;
P la charge totale de chaque arbalétrier, répartie uniformément sur toute leur longueur.

Ce cas est celui du 1° du n° 578, dans lequel les arbalétriers sont remplacés par les systèmes rigides ADB, A′D′B. Ainsi on a d'abord

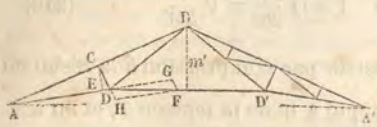
$$T = P\frac{l}{2m}.$$

Puis, par analogie avec le 1°, le système ADB donne

$$Q = \frac{P}{4}\cos a = \frac{P}{4} \times \frac{l}{L}, \quad T'' = Q\,\frac{N}{2M}, \quad T' = T + T'',$$

$$P\,\frac{lL}{16L} \quad \text{ou} \quad \frac{Pl}{16} = \frac{RI}{n}.$$

Fig. 87.




3° *Cas où le tirant est à un niveau supérieur à celui des points d'appui*, fig. 87. Quant à la tension T, on se trouve dans les conditions de l'entrait retroussé (3°, n° 578),

et on a

$$T = P\,\frac{l}{2m'}.$$

Comme au 2°

$$Q = \frac{P}{4} \times \frac{l}{L}.$$

Décomposant T, représenté à une certaine échelle par DF, en deux forces, l'une $DG = T_1$ dirigée suivant AD, et l'autre $DH = T_2$ dirigée suivant CD, le point D étant en équilibre sous l'action des 3 forces $Q + T_2$, $T' - T_1$ et T'', on a

$$T'' = (Q + T_2)\,\frac{N}{2M} \quad \text{et} \quad T' = T_1 + T''.$$

On a encore, comme au 2°, pour calculer la section de l'arbalétrier,

$$\frac{Pl}{16} = \frac{RI}{n}.$$

Cette section devra être suffisante pour que AC puisse résister par compression.

Si l'on avait un plus grand nombre de contre-fiches, comme dans la partie droite de la fig. 87, on suivrait la même marche pour calculer les tensions des tirants successifs, la pression des contre-fiches et les efforts auxquels sont soumis les entraits.

Comme les assemblages ajoutent à la solidité, et que l'on ne fait usage pour les grandes charpentes que de matériaux de choix, après avoir tenu compte de tous les efforts, on pourra faire R égal à 8 000 000 pour le fer et à 1 000 000 pour le bois.

**580.** *Poids et inclinaison des toits.* Il ne nous reste, pour pouvoir calculer les dimensions des différentes pièces d'une ferme, qu'à évaluer le poids P (578 et 579), qui se compose du poids de la couverture, de celui du bois qui entre dans la charpente, de celui de la neige qui peut se déposer sur le toit, et de la pression du vent.

M. Ardant *donne les résultats suivants pour les couvertures les plus usitées.*

| NATURE DE LA COUVERTURE. | INCLINAISON du toit sur l'horizon. | POIDS du mètre carré de couverture (bois non compris) | CUBE DE BOIS par mètre carré. |
|---|---|---|---|
| | | k. | m. c. |
| Tuiles plates à crochet. . . . . | 45° à 33° | 60 | 0.063 |
| Tuiles creuses, posées à sec. . | 27 à 21 | 75 à 90 | 0.058 |
| *Id.* maçonnées. . . | 31 à 27 | 136 | 0.068 |
| Ardoises. . . . . | 45 à 33 | 38 | 0.056 |
| Cuivre en feuilles. . . . . | 21 à 18 | 14 | 0.042 |
| Zinc, n° 14, et tôle galvanisée. | 21 à 18 | 8.50 | 0.042 |
| Mastic bitumineux. . . . . | 21 à 18 | 25 | 0.056 |

La neige pesant dix fois moins que l'eau, pour la couche maximum de $0^m,50$ qui peut s'amonceler sur un toit, il faudrait compter sur un poids de 50 kilogrammes par mètre carré de couverture. Dans nos climats, on compte ordinairement sur 25 kilogrammes.

Quant à l'influence du vent, on s'en rendra compte à l'aide de ce qui a été dit n° 209, soit que l'on suppose que des rafales amènent le vent normalement aux pans du toit, soit que l'on suppose que le vent se meuve horizontalement et frappe le toit sous un certain angle. En France, on néglige le plus souvent l'influence du vent, dont la vitesse n'est en moyenne que de 6 à 7 mètres.

381. *Couvertures des édifices.* Dans les pays où il pleut rarement et ne neige jamais, les toits sont peu inclinés. En Égypte et en Syrie, toutes les maisons sont couvertes en terrasse ; dans le midi de la France, les toits ont une faible pente ; dans nos climats, la pente la plus ordinaire est de 1/3 de la largeur de l'édifice. Du reste, les matériaux employés à la couverture ont une grande influence sur cette pente. Ces matériaux sont la tuile, l'ardoise, le bardeau, le cuivre, le zinc, le plomb, le fer, la fonte de fer.

382. *Tuiles.* On a fabriqué des tuiles de plusieurs formes. A Paris, on fait un usage fréquent de tuiles plates, dites de Bourgogne, dont les dimensions sont variables; celles du grand moule ont $0^m,31$ sur $0^m,23$ et $0^m,0157$ d'épaisseur, il en faut 42 par mètre carré de surface de toiture; celles du petit moule ont $0^m,257$ de longueur sur $0^m,183$ de largeur et $0^m,014$ d'épaisseur; il en faut 64 par mètre carré de toiture.

On pose les tuiles sur des lattes de $1^m,30$ de longueur et de $0^m,0067$ d'épaisseur, espacées tant plein que vide si elles ont $0^m,05$ à $0^m,06$ de largeur. Ces dimensions sont le plus souvent aujourd'hui réduites à $0^m,0034$ d'épaisseur sur $0^m,041$ à $0^m,045$ de largeur, ce qui ne diminue

pas peu la solidité de la toiture. On fixe les lattes avec des clous de $0^m,027$ de longueur, et de 620 à 640 au kilogramme.

Les tuiles se posent par rangs horizontaux en commençant par le bas du toit. Les tuiles d'un rang couvrent aux deux tiers celles du rang inférieur; la partie qui reste découverte prend le nom de *pureau*. Le rang inférieur se pose sur mortier, et il fait saillie de $0^m,10$ sur la corniche; sur ce premier rang, on en pose un second à joints croisés, qu'on nomme *doublis*. Quand il y a une corniche avec chaîneau, on pose ordinairement un rang simple de tuiles s'appuyant sur le chaîneau. Quand il n'y a pas de corniche, on la remplace par une chanlate sur laquelle on pose les tuiles comme sur la corniche (576).

Les tuiles creuses employées dans le midi de la France ont $0^m,40$ de longueur et $0^m,013$ d'épaisseur; elles ont $0^m,20$ de diamètre à un bout et $0^m,15$ à l'autre, ce qui les rend coniques.

La pente des combles couverts de ces tuiles ne doit pas excéder 26°, et elle est ordinairement de 18° à 21°. Les rangs verticaux de tuiles présentant leur concavité sont espacés de $0^m,04$, et les tuiles se recouvrent en longueur de $0^m,05$ à $0^m,06$. Les intervalles compris entre ces premiers rangs se recouvrent par d'autres rangs présentant leur convexité.

Il y a les tuiles flamandes, dites *tuiles pannes*; la fig. 15, planche III, représente leur coupe transversale et la manière dont elles s'agrafent latéralement; elles se posent sur de grosses lattes bien dressées. Ces tuiles ont environ $0^m,35$ de côté sur $0^m,016$ d'épaisseur; il en faut 15 1/4 par mètre carré de toit.

Les tuiles romaines, qui s'agrafent mutuellement sur deux arêtes, et se posent de manière qu'une de leurs diagonales soit horizontale et l'autre dirigée suivant la pente du toit, ont été ressuscitées il y a quelques années par M. Gourlier; elles pèsent 45 kilog. le mètre carré.

Plusieurs personnes se sont occupées de la fabrication des tuiles plates et en ont donné des modèles de différentes formes et grandeurs, dont un des plus remarquables est celui que M. Jolibois exploite depuis plusieurs années dans la Lorraine, à Deyvillers, près d'Épinal, à Lerrain, près de Mirecourt, et à Corny, près de Metz.

La pose des tuiles Jolibois est facile et n'exige pas des ouvriers très-expérimentés. Les faibles surfaces de contact n'entretiennent pas l'humidité, et par suite évitent cette végétation mousseuse qui entraîne promptement la ruine des couvertures. La capillarité et le vent ne peuvent faire franchir à l'eau et à la neige les fortes saillies qui entourent les tuiles. La couverture est d'un aspect agréable qui s'harmonise très-bien avec les grands monuments.

On ne se douterait pas que le bâtiment de Deyvillers, qui provient d'une ancienne papeterie, ait jamais eu d'autre destination que celle à laquelle il est utilisé, tant les machines et appareils y sont disposés avec art, et le service se fait avec régularité et ensemble.

Tout le travail de la terre se fait dans un étage souterrain, au milieu duquel se trouvent les fours, dont le massif s'élève au niveau du rez-de-chaussée.

On fait détremper la terre pendant 24 heures dans une cave qui longe extérieurement le bâtiment de la fabrique ; puis on la fait passer entre des cylindres en fonte espacés de 5 millimètres, afin qu'aucune particule de terre n'échappe au complet ramollissement. Un ouvrier la reçoit alors et la met en boules que l'on fait passer deux et jusqu'à trois fois entre de nouveaux cylindres espacés seulement de 1 millimètre, qui la réduisent en pâte fine et homogène. A cet état, on la tasse, en la triturant avec les pieds, dans une caisse rectangulaire en bois. La caisse étant remplie, en l'ouvrant, la terre bien piétinée en conserve la forme, et des fils de fer placés sur le fond mobile de la caisse la divisent en quatre ou six parties, que deux ouvriers refendent en plaques, à l'aide d'un fil de fer dont ils tiennent les extrémités. Les plaques se placent sur des moules en fonte, et un coup de presse à vis leur donne la forme des tuiles. On les pose sur des planchettes en bois et on les porte aux étendoirs, où on leur laisse prendre assez de consistance pour qu'on puisse les manier sans les déformer. A cet état, on enlève les bavures qu'ont laissées les presses ; puis on les porte de nouveau aux étendoirs, mais en les plaçant dans une position verticale et au-dessus des fours, où la température plus élevée termine la dessiccation.

Les étendoirs sont au premier étage et dans un grenier formant un deuxième étage.

M. Jolibois cuit ses tuiles dans douze fours très-simples, dont on va comprendre facilement la disposition. Un massif de $2^m,60$ environ de largeur en maçonnerie de briques, ayant pour coupe horizontale un rectangle terminé par deux demi-cercles, occupe le milieu de tout le système. Ce massif est entouré complétement par une voûte continue en plein cintre de $1^m,70$ de portée, ayant pour pieds-droits d'un côté tout le pourtour du noyau, et de l'autre un mur de $1^m,50$ d'épaisseur. Cette voûte annulaire est divisée en douze compartiments par des murs transversaux de $0^m,70$ d'épaisseur espacés entre eux de $3^m,40$ dans œuvre, et chacun de ces compartiments forme un four. Il y a six fours placés le long des parties droites du massif central et trois autour de chacune des parties arrondies.

Chaque four a ainsi $3^m,40$ de longueur totale et $1^m,70$ de largeur ; sa hauteur sous clef est de $2^m,55$.

Les murs séparatifs sont percés chacun de quinze trous de $0^m,15$ de côté, convenablement placés à trois étages différents et servant à faire passer les gaz d'un four dans un autre. Des registres en fonte, se mouvant horizontalement, sont manœuvrés par des tiges qui traversent les murs extérieurs des fours et servent à régler ce passage. Deux petits

regards faits dans les murs extérieurs, près des murs séparatifs, guident dans la manœuvre des registres.

Sur le haut de chaque mur séparatif débouche un canal qui communique avec un conduit qui règne sur tout le massif et va joindre la cheminée commune, qui est placée au milieu de ce massif. Ces canaux sont garnis de registres, afin qu'en les fermant et en ouvrant les trous des murs séparatifs, on puisse faire passer la flamme d'un même foyer dans deux, trois ou même quatre fours.

La cheminée est divisée en deux compartiments, dont l'un sert pour les fours en feu, et l'autre à laisser se dégager le calorique des fours cuits, quand le service de l'établissement ne le réclame pas.

Chaque four est divisé en deux parties, l'une formant la chambre de chauffe, ou foyer, et l'autre recevant la marchandise à cuire.

La chambre de chauffe a $0^m,50$ de longueur; elle règne sur toute la largeur du four et en occupe toute la hauteur. On y arrive par une porte de $0^m,50$ de largeur et $1^m,30$ de hauteur faite dans le mur extérieur. Cette porte est murée en briques pendant la cuisson, sauf une ouverture de $0^m,30$ à $0^m,40$ de côté, fermée par une dalle, et servant à faire un petit feu dans le premier four mis en feu, et au besoin à retirer les cendres ou les braises pendant la cuisson normale. La voûte est percée de deux ouvertures de $0^m,25$ de côté, au-dessus de chaque chambre de chauffe; c'est par ces ouvertures que l'on introduit le bois, qui brûle dans une position verticale, et par suite mieux en regard de toute la masse à cuire et en contact avec le courant d'air. Le foyer est séparé de la marchandise par une murette en briques réfractaires, à joints de $0^m,02$, afin de laisser passer librement la flamme, tout en préservant les tuiles du premier choc du foyer.

Le reste du four est rempli complétement. On ménage des carneaux de $0^m,10$ de largeur sur $0^m,30$ de hauteur à la partie inférieure du four. Ces carneaux sont faits en briques, et recouverts avec des dalles ayant $0^m,35$ de longueur et espacés de $0^m,05$. La marchandise est introduite dans le four par une ouverture de $0^m,40$ de côté, pratiquée dans la voûte, du côté opposé au foyer.

Deux regards placés au sommet de la voûte permettent de juger si toutes les parties du four sont également atteintes par le calorique.

Dans le cas où on brûlerait de la houille ou de la tourbe, on établirait une grille et un cendrier au bas de la chambre de chauffe.

La durée du feu est de 24 heures pour le premier four mis en feu, dont 14 de petit feu et 10 de grand. Tous les autres fours qui ont profité de la chaleur perdue dans les fours précédents sont cuits en 12, 10 et 8 heures de feu, selon la qualité du bois et le soin qu'a mis le chauffeur à bien utiliser la chaleur perdue. La cuisson parfaite d'un four n'exige que 4 stères de bois ou 80 fagots, et on a encore assez de chaleur pour sécher la marchandise.

Une roue hydraulique fait marcher les cylindres et élève les tuiles dans les étendoirs. Les deux presses sont encore mues à bras d'homme.

Les deux presses marchant bien peuvent donner 4000 tuiles par jour; mais comme on fait défourner par les ouvriers d'une presse, et que ce travail prend à peu près la moitié du temps, on ne moule par semaine que 16000 tuiles, dont 1000 sont rejetées avant d'arriver au four.

Le personnel de la fabrique est de cinquante personnes, tout compris, employés, ouvriers, femmes et enfants.

M. Jolibois est breveté pour les différents détails de sa fabrication.

Avant M. Jolibois, MM. Gilardoni frères exploitaient déjà le même modèle à Altkirch et aujourd'hui il l'est dans différentes localités, et entre autres à Paris, par M. *Muller*.

583. *Ardoises.* On en fait de trois modèles, qui ne diffèrent que par leurs dimensions. Le grand modèle d'Angers a $0^m,298$ sur $0^m,217$, le moyen modèle de Charleville a $0^m,271$ sur $0^m,189$, et le petit modèle (cartelettes d'Angers) $0^m,217$ sur $0^m,162$. L'épaisseur commune à toutes les ardoises est de $0^m,0033$; pour les cartelettes d'Angers, elle n'est que de $0^m,0028$. Le mille pèse 612 kilog. pour le grand modèle, 485 kilog. pour le modèle moyen, et 284 kilog. pour le petit. On enlève les angles de leur partie supérieure.

Les ardoises se recouvrent des 2/3 environ de leur longueur, le *pureau* n'est que de 1/3; ce grand recouvrement est dû à ce que la capillarité tend toujours à faire monter l'eau entre les ardoises. La pente des toits varie entre 33° et 45°; avec une pente moindre, malgré le grand recouvrement, les voliges sur lesquelles on pose les ardoises sont sujettes à se mouiller, elles se pourrissent, les clous qui y fixent les ardoises n'y adhèrent plus, et le vent peut enlever la couverture.

Les ardoises se posent sur des planches en bois blanc, ordinairement en sapin, de $0^m,011$ d'épaisseur, non jointives, et disposées, autant que possible, de manière que toutes leurs faces supérieures soient dans un même plan. Il faut 46 ardoises du grand modèle, 59 du moyen ou 85 du petit pour couvrir un mètre carré de toit.

Comme pour les autres couvertures, on commence à poser les ardoises par l'égout, que l'on forme en superposant sur la chanlate deux ou trois rangs d'ardoises, afin de donner assez de solidité à cette partie inférieure pour résister au vent. Les ardoises qui forment l'égout se posent ordinairement sur plâtre, en leur laissant faire saillie de $0^m,04$ à $0^m,05$ sur la chanlate. Quand on a de bonnes tuiles, on les emploie à faire l'égout, que l'on met alors en saillie de $0^m,10$ environ sur la chanlate.

A partir de l'égout, les ardoises se placent par rangs horizontaux comme pour les tuiles plates (582).

Pour percer et clouer les ardoises, et tailler leurs bords, l'ouvrier se sert d'un marteau qui porte une pointe d'un côté, une tête étroite di-

rigée suivant la direction du manche de l'autre, et dont le manche est un tranchant en acier sur une certaine longueur; l'ouvrier se sert en outre d'une enclume, qui n'est autre chose qu'une lame d'acier tranchante, portant vers le milieu de sa longueur une pointe en retour d'équerre. Il implante cette queue dans les voliges, à côté de lui; puis appliquant l'ardoise sur l'enclume, en laissant dépasser ce qu'il veut couper, il trace, avec la pointe de son marteau qu'il fait glisser le long de l'enclume, une ligne apparente sur l'ardoise; il retourne son ardoise, et faisant correspondre la ligne qu'il vient de tracer au tranchant de l'enclume, à l'aide du manche de son marteau qu'il applique obliquement le long de l'enclume, il frappe à petits coups sur l'ardoise pour en détacher la partie qui dépasse la ligne tracée. Pour percer l'ardoise, il applique le point voisin du trou sur l'enclume, et d'un petit coup frappé avec la pointe de son marteau, il fait le trou. La tête du marteau lui sert à clouer les voliges et les ardoises. Les clous employés pour fixer les ardoises sont de 570 au kilogramme.

Dans les noues et sur les arêtiers, on fait usage de feuilles de métal, qui pénètrent sous les ardoises voisines dans le premier cas, et qui sont placées dessus dans le second.

Quand on calcule le prix d'une couverture, il faut évaluer sa surface exacte, et ajouter 1/5 environ en sus pour les sujétions d'égouts, de faîtes, etc.; à Angers, on exploite encore des ardoises dites anglaises, qui ont de très-grandes dimensions :

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| N° 1. | Longueur, | 0m,64 | Largeur, | 0m,35 | Pureau, | 0m,28 |
| N° 2. | *id.* | 0m,60 | *id.* | 0m,36 | *id.* | 0m,26 |
| N° 3. | *id.* | 0m,60 | *id.* | 0m,31 | *id.* | 0m,21 |

384. *Les bardeaux* sont des tuiles en bois de chêne, et quelquefois de sapin; ils ont 0m,406 de longueur, 0m,135 de largeur et 0m,011 d'épaisseur; il en faut 55 pour couvrir un mètre carré de toit. On les dispose comme les ardoises. L'inclinaison du toit doit être de 45° au moins, afin que l'eau n'y séjourne pas.

385. *Plomb.* Les tables de plomb employées à la couverture ont 3m,90 de longueur sur 1m,95 de largeur, et 0m,00338 à 0m,0045 d'épaisseur. Le mètre carré de couverture en plomb de 0m,00338 pèse environ 40 kilog., et 53 kilog. pour celui de 0m,0045 (45).

Le recouvrement des feuilles, dans le sens de la longueur, varie de 0m,081 à 0m,162; latéralement, les feuilles se relient entre elles en les repliant de manière à former un ourlet. On les pose sur voliges; pour cela, on commence par placer les chéneaux qui doivent régner au bas du comble, on rabat le dossier de ces chéneaux sur les voliges, et dessus on fixe, par des crochets espacés de 0m,50 les uns des autres, le bas des tables; on déroule les planches en montant, et on les fixe avec

de forts clous traversant jusqu'à une certaine profondeur dans les chevrons.

586. *Cuivre.* Les feuilles de cuivre ordinairement employées ont $1^m,407$ sur $1^m,137$, et $0^m,00068$ ou $0^m,00075$ d'épaisseur; le poids du mètre carré est de $6^k,11$ avec les premières feuilles et de $7^k,64$ avec les secondes. Le poids exprimé en livres donne le numéro des feuilles; ainsi les dernières feuilles étant du n° 25, elles pèsent 25 livres ou $12^k,24$; l'épaisseur est de 4 points ou $0^m,00075$. Le recouvrement des feuilles est de $0^m,12$. Les joints se font comme pour les feuilles de zinc (588).

587. *Tôle de fer.* En Russie et en Suède, on emploie la tôle; les feuilles ont $0^m,70$ sur $0^m,50$ et une épaisseur de $0^m,00035$; elles pèsent $3^k,08$, ce qui fait $8^k,80$ par mètre carré.

Depuis le zingage de la tôle, on a fait quelques applications en France d'ardoises en tôle ayant subi cette opération.

Deux pavillons adjacents à la grille de l'Observatoire de Paris sont couverts en ardoises de fonte de fer.

588. *Zinc.* Les assemblages doivent permettre une dilatation facile dans tous les sens. Par le haut, les feuilles se fixent sur les voliges à l'aide de clous en zinc; le fer doit être proscrit, parce qu'il accélère l'oxydation. Par le bas, la feuille recouvre les clous qui fixent la feuille inférieure, à laquelle elle s'agrafe par des crochets que l'on a soudés sous sa face inférieure, comme l'indique la figure 16, planche III. Les crochets peuvent être simplement fixés par les clous de la feuille inférieure, ce qui dispense de les souder (fig. 17).

Latéralement, les feuilles s'agrafent entre elles, soit par un simple ourlet, comme l'indique la fig. 18, soit en redressant leurs bords que l'on applique contre un liteau en bois et en recouvrant le tout d'un chapeau en zinc (fig. 19), ou encore en faisant une double agrafe recouverte d'un chapeau, sans liteau (fig. 20).

Depuis quelques années, on a fait usage d'ardoises en zinc qui ont $0^m,35$ à $0^m,40$ sur $0^m,30$ à $0^m,35$ de largeur; elles ont la forme des tuiles pannes (fig. 15); elles se clouent par le haut sur les voliges, et s'agrafent par le bas aux ardoises inférieures à l'aide de deux crochets, comme l'indique la figure 16.

*Tarif du zinc laminé de la Vieille-Montagne.*

| NUMÉROS. | ÉPAISSEUR des feuilles. | DIMENSION ET POIDS DES FEUILLES (1). | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Largeur, 0m.50. Longueur, 2m.00. Surface, 1m.00. | Largeur, 0m.65. Longueur, 2m.00. Surface, 1m.30. | Largeur, 0m.80. Longueur, 2m.00. Surface, 1m.60. |
| | m. | k. | k. | k. |
| 10 | 0.00051 | 3.45 | 4.45 | 5.50 |
| 11 | 0.00060 | 4.05 | 5.30 | 6.50 |
| 12 | 0.00069 | 4.65 | 6.10 | 7.50 |
| 13 | 0.00078 | 5.30 | 6.90 | 8.50 |
| 14 | 0.00087 | 5.95 | 7.70 | 9.50 |
| 15 | 0.00096 | 6.55 | 8.55 | 10.50 |
| 16 | 0.00110 | 7.50 | 9.75 | 12.00 |
| 17 | 0.00123 | 8.45 | 10.95 | 13.50 |
| 18 | 0.00136 | 9.35 | 12.20 | 15.00 |
| 19 | 0.00148 | 10.30 | 13.40 | 16.50 |
| 20 | 0.00166 | 11.25 | 14.60 | 18.00 |
| 21 | 0.00185 | 12.50 | 16.25 | 20.00 |
| 22 | 0.00202 | 13.75 | 17.90 | 22.00 |
| 23 | 0.00219 | 15.00 | 19.50 | 24.00 |
| 24 | 0.00237 | 16.25 | 21.10 | 26.00 |
| 25 | 0.00256 | 17.50 | 22.75 | 28.00 |
| 26 | 0.00266 | 18.80 | 24.40 | 31.00 |

(1) On admet une tolérance de 25 décagrammes en moins dans le poids de chaque feuille.

*Emploi des divers numéros de zinc.*

Nos 1 à 9. Les feuilles en numéros très-faibles, du n° 1 au n° 9, s'emploient pour la perforation, pour les cribles, stores et tamis en zinc, et pour le satinage des papiers. Leur prix et leur fabrication sont exceptionnels.

Ils s'emploient encore pour la fabrication de petits objets en zinc, tels que miroirs, porte-mouchettes, éteignoirs, tabletteries, et tous autres objets légers désignés sous le nom d'articles de Paris.

Nos 10 et 11. Ces numéros sont très-employés dans la fabrication des lampes, des lanternes et pour tout ce qui concerne la ferblanterie en général.

Ces numéros s'estampent encore très-facilement en ornements divers pour girouettes, clochetons, etc.

Ils s'appliquent aussi le long des murs pour préserver les appartements de l'humidité, et dans les cabinets comme revêtements.

Nos 12 et 13. Le n° 12 sert à la fabrication des objets de ménage, tels que seaux, brocs, arrosoirs, bains de pieds, etc.

Avec ces numéros se font aussi les descentes d'eau pour les petites constructions, les couvertures de hangars ou ateliers provisoires, des recouvrements de saillies, corniches, etc.

N° 14. Le n° 14 est spécial aux toitures; c'est celui qui doit être employé le plus généralement. Avec ce numéro, une couverture bien faite doit donner des résultats toujours satisfaisants, et durer au moins trente ans sans réparations.

Des numéros au-dessous ne pourraient faire un service convenable.

Nos 15 et 16. Ces numéros, en grande dimension, sont employés pour couvertures de monuments, chéneaux, caisses d'eau, bains de siége et fonds de baignoires.

En petites dimensions, ils servent pour doublage de navires aux endroits qui supportent le moins de fatigue.

N° 17. En grande dimension, ce numéro s'emploie pour les parois de baignoires, et en petite dimension, pour doublage à l'avant des navires, où le frottement de la lame exige du doublage une grande résistance.

Nos 18 à 26. On emploie ces épaisseurs pour les pompes, la garniture intérieure des cuves à papeteries, des réservoirs et cristallisoirs divers, en usage dans les raffineries, etc.; ils offrent une résistance telle qu'une caisse ainsi doublée doit durer cinquante ou soixante ans.

# SIXIÈME PARTIE.

## Routes. Ponts. Canaux.

---

### ROUTES.

**389.** *Division des routes.* On appelle *route*, la partie du sol préparée pour faciliter les communications par terre entre les divers points importants d'un pays. Lorsqu'elle a une faible étendue, et que les points qu'elle relie sont peu importants, elle prend le nom de *chemin*.

Les routes se divisent en *routes impériales*, qui sont construites et entretenues par l'État, et en *routes départementales*, qui sont établies et entretenues avec les fonds votés par les conseils généraux des départements.

Une route impériale est dite de *première classe* lorsqu'elle unit Paris à un État voisin ou à un port militaire ; de *deuxième classe*, quand elle va de Paris à une des principales villes de France, et de *troisième classe*, si elle établit une communication transversale s'étendant sur plusieurs départements. Quelquefois les départements contribuent à l'établissement de ces dernières.

Une route est dite départementale lorsqu'elle unit les villes d'un même département ou de deux départements voisins.

Les chemins vicinaux sont des ramifications qui établissent les communications entre les routes et les différents villages qu'elles ne traversent pas. Il y a encore les *chemins ruraux*, ou de culture, établis dans chaque commune pour faciliter le transport des engrais et des récoltes. Tous ces chemins sont entretenus par les communes intéressées.

**390.** *Composition d'une route.* Une route se compose :

1° De la *chaussée*, partie centrale consolidée pour résister à l'action destructive des pieds des chevaux et des roues de voitures ;

2° Des *accotements*, parties servant à consolider la chaussée de chaque côté, et destinées au passage des piétons et même des voitures pendant la belle saison ;

3° Des *fossés* destinés à donner écoulement aux eaux pluviales, ou même à les recueillir si les localités ne permettent pas de leur donner écoulement ; on conçoit que dans ce dernier cas ils doivent être plus grands que dans le premier.

Dans le département de la Moselle, outre la chaussée de 6 mètres de largeur, les accotements, qui n'ont que 1 mètre de largeur chacun, et les fossés de $1^m,50$, on a disposé entre un accotement et le fossé voisin un trottoir de $1^m,50$ de largeur pour les piétons. Ce trottoir est établi à $0^m,20$ au-dessus de l'accotement, ce qui fait qu'il n'est jamais dégradé par les voitures. De l'autre côté de la route on a disposé, entre l'accotement et le fossé, des emplacements de 3 mètres de largeur pour approvisionner les matériaux d'entretien.

Si la route, au lieu d'être en tranchée, est en remblai, on remplace les fossés par des talus dont l'inclinaison est de 1,5 de base pour 1 de hauteur.

**391.** *TABLEAU des dimensions des différentes parties des routes.*

| DÉSIGNATION des routes. | LARGEUR de la chaussée (*a*). | de chaque accotement. | de chaque fossé (*b*). | totale, non compris les fossés (*c*). |
|---|---|---|---|---|
| Routes impériales des trois classes . . . . | $7^m.00$ à $5^m.00$ | $3^m.50$ à $2^m.50$ | $1^m.50$ | $14^m.00$ à $10^m.00$ |
| Routes départementales . . . . . | 5 .00 4 .00 | 2 .50 2 .00 | 1 .50 | 10 .00 3 .00 |
| Chemins vicinaux de grande communicat. | 5 .00 3 .00 | 2 .00 1 .50 | 1 .00 | 8 .00 6 .00 |

(*a*) La largeur 5 mètres est un peu faible pour les routes impériales.
(*b*) La profondeur des fossés est ordinairement de $0^m,50$.
(*c*) Près de Paris, la largeur totale, non compris les fossés, atteint quelquefois jusqu'à 20 mètres.

**392.** *Pentes de la surface de la route.* La ligne tracée au milieu de la surface de la chaussée est l'*axe* de la route; l'intersection de la route par un cylindre vertical passant par l'axe est le *profil en long*, et une section faite par un plan perpendiculaire à l'axe est un *profil en travers* (*Int.* 1275).

Transversalement, la chaussée se profile suivant un arc de cercle dont la flèche est ordinairement le 1/50 de la corde; il en résulte une pente suffisante pour donner écoulement à l'eau, sans cesser de permettre aux voitures de circuler partout, ce qui évite les ornières. Dans les villes, les rues ont à peu près le même profil entre les ruisseaux. La pente des accotements est en général réglée à $0^m,04$ par mètre.

Si la route est établie sur le penchant d'un côteau, de manière à former précipice d'un côté, on incline toute la surface de la route vers la montagne. Le plus souvent, afin d'éviter encore plus sûrement les

accidents, du côté de la vallée, on borde la route d'un petit mur ou d'un bourrelet en terre couvert de gazon. Un fossé établi du côté de la montagne reçoit les eaux de celle-ci et de la route, pour les déverser du côté de la vallée, si cela est nécessaire, par des petits aqueducs passant sous la route.

Lorsque la route suit le revers d'un côteau, pour éviter, autant que possible, les déblais et remblais, on prend les déblais du côté de la montagne pour former les remblais du côté de la vallée; mais il arrive quelquefois, pour éviter des sinuosités trop prononcées, que l'on est obligé de faire entièrement la route en tranchée; dans ce cas, les deux revers de la chaussée sont inclinés vers l'axe pour y amener les eaux, on fait la chaussée plus large, et on supprime les accotements et les fossés si la tranchée est profonde, ce qui diminue considérablement les déblais.

Si la tranchée a peu de longueur et peu de profondeur, on ne supprime que les fossés; on incline les accotements vers la chaussée, et celle-ci vers les accotements, ce qui produit sur chacun de ses côtés un ruisseau pour recevoir les eaux.

Suivant l'axe de la route, la pente maximum est fixée à $0^m,05$ par mètre. Quant à la pente minimum, on est porté à croire que, pour la facilité des transports, la route doit être horizontale; mais comme, malgré la pente transversale, l'eau séjourne encore dans les sillons que laissent les roues des voitures, il convient, pour le bon état de la route, et par suite pour la facilité du tirage des voitures, qu'elle ait une inclinaison longitudinale d'au moins $0^m,005$ par mètre; cette inclinaison suffit pour que l'eau suive l'ornière, et s'accumule en différents points en assez grande quantité pour rompre le bourrelet de l'ornière et prendre un écoulement latéral.

**395.** *Influence de la pente longitudinale des routes sur le tirage des voitures.* Sur une route horizontale on a

$$R = kP.$$

R force de traction;
P charge totale traînée, voiture comprise;
$k$ rapport de la force de traction à la charge traînée (41 et 460).

Théoriquement, sur une route en pente, on a sensiblement (448)

$$R = kP + P \sin \alpha.$$

$\alpha$ angle que fait la route avec l'horizon, $\alpha$ étant très-petit, on peut prendre tangente $\alpha$, c'est-à-dire la pente, pour $\sin \alpha$, qui alors varie de $0^m,005$ à $0^m,05$.

*Les expériences de* M. Gordon, *dont le tableau suivant donne les résultats, prouvent que la pratique ne s'accorde pas avec la formule précédente.*

| PENTE PAR MÈTRE. | VALEUR THÉORIQUE de P, pour une même valeur de R. | VALEUR PRATIQUE de P, pour une même valeur de R. | DIFFÉRENCE. |
|---|---|---|---|
| m. | | | |
| 0.000 | 11.000 | 11.000 | 0.000 |
| 0.005 | 8.800 | » | » |
| 0.010 | 7.333 | 9.900 | 2.567 |
| 0.020 | 5.500 | 8.355 | 2.855 |
| 0.030 | 4.400 | » | » |
| 0.040 | 3.667 | » | » |
| 0.050 | 3.143 | 5.859 | 2.716 |

Les valeurs théoriques de P consignées dans ce tableau sont calculées dans l'hypothèse de $k = 0.02$, d'où il résulte que l'on a $R = 0.02 \times 11 = 0.22$.

On ne peut attribuer ce grand avantage de la pratique sur la théorie qu'au meilleur état dans lequel se trouve la route à mesure qu'elle est plus inclinée (592), ce qui diminue la valeur de $k$.

594. *Direction d'une route.* La direction d'une route est déterminée par la position des points principaux qu'elle doit relier, sans avoir égard à la position des points intermédiaires. Le tracé consiste à fixer, soit sur le terrain, soit sur un dessin, la position de tous les points de l'axe de la route, en s'assujettissant à passer par les points qui ont déterminé la direction.

Une route doit traverser le plus grand nombre possible de lieux habités, et surtout commerciaux et manufacturiers, ou en approcher le plus possible, afin de les faire participer aux avantages qu'elle procure. C'est donc d'après des considérations commerciales ou militaires que l'on fixe la direction d'une route; ce qui ne peut être que du ressort de l'administration. Mais comme, aux considérations d'utilité publique, il faut joindre l'économie d'exécution, généralement l'art doit être consulté; ainsi, par exemple, si la route doit traverser un cours d'eau, c'est à l'ingénieur à fixer le point où il sera le plus économique de le passer, en ayant égard à toutes les dépenses et à l'éloignement de la direction fixée par l'utilité. C'est surtout quand la route doit franchir une chaîne de montagnes, que l'ingénieur doit intervenir, pour déterminer le point le plus bas du faîte, afin de diminuer autant que possible les frais de tranchée et rendre les communications faciles.

595. *Considérations générales sur la détermination du point bas d'une chaîne de montagnes.* Pour déterminer le point minimum du faîte d'une chaîne de montagnes, afin de ne pas se jeter dans des nivellements fort pénibles et très-dispendieux, surtout dans les pays très-accidentés (*Int.* 1277), on se guidera par les considérations suivantes, déduites de principes posés par M. Brisson.

En considérant une portion assez étendue d'un continent, on y re-

marque des chaînes de montagnes et des cours d'eau, et si on examine attentivement une de ces chaînes, on s'aperçoit qu'il est possible de tracer sur sa crête une ligne telle, que les eaux qui s'y répandent s'écoulent en partie sur l'un des versants et en partie sur l'autre. Lorsque ces eaux coulent dans deux fleuves différents, cette ligne, qui part des côtes de la mer, de part et d'autre de l'embouchure du fleuve, et qui contourne complétement ce fleuve en passant à sa source, prend le nom de *faîte*.

La portion de pays enveloppée par le faîte prend le nom de *bassin*.

Le fleuve suit nécessairement la ligne formée par tous les points les plus bas. Cette ligne prend le nom de *thalweg*, mot qui signifie chemin de la vallée.

Le fleuve divise le bassin en deux parties inclinées. La partie placée à droite du fleuve prend le nom de *versant droit*, et celle qui se trouve à gauche, celui de *versant gauche*. La droite du fleuve se trouve à droite de la personne qui descend son cours, c'est-à-dire va de l'*amont* à l'*aval*, et la gauche à sa gauche.

La division la plus naturelle d'un pays est celle en bassins, désignés chacun par le nom du fleuve qui en reçoit les eaux. On emploie cette division pour les affaires qui ont rapport à la navigation; ainsi on distingue les bassins de la Meuse, du Rhin, de la Seine, de la Garonne, du Rhône, etc.

Comme des nivellements seuls peuvent faire reconnaître la véritable position des faîtes, il en résulte que la division en bassins n'a jamais eu d'application politique ni administrative.

Aux chaînes de montagnes dont les faîtes séparent les bassins, et que l'on appelle *chaînes principales*, s'en rattachent d'autres appelées *chaînes secondaires*, dont les faîtes sont à peu près perpendiculaires à celui de la chaîne principale, et à ces chaînes secondaires se rattachent des *chaînes tertiaires*, dont les faîtes sont à peu près perpendiculaires à ceux des chaînes secondaires, et par conséquent parallèles à celui de la chaîne principale.

Deux chaînes tertiaires voisines sont séparées par un thalweg qui amène les eaux des versants tributaires dans le thalweg qui sépare les deux chaînes secondaires voisines, et ce thalweg secondaire conduit les eaux qui y affluent dans le thalweg principal. Ces relations, qui existent entre les thalwegs et les chaînes de montagnes, et les considérations suivantes, peuvent servir à déterminer *à priori*, à l'aide d'une bonne carte, non-seulement la position d'un faîte, mais aussi son point le plus bas, où par conséquent il convient de faire passer la route :

1° Le faîte d'une chaîne de montagnes, sans avoir rien de géométrique ni dans le sens horizontal ni dans le sens vertical, est cependant à peu près droit dans son ensemble; il est toujours incliné dans le même sens que le thalweg;

2° Quand un faîte est rencontré en un même point par deux ou par un plus grand nombre de faîtes secondaires, ce point doit être élevé au maximum ;

3° Quand un faîte est rencontré par deux thalwegs, le point commun de rencontre doit être un minimum relatif (canaux du Rhône au Rhin et du Languedoc) ;

4° Quand un faîte est rencontré par un faîte et un thalweg secondaire, il offre une inflexion horizontale au point de rencontre, sans avoir rien de remarquable dans le sens vertical ;

5° Quand deux thalwegs, après avoir été parallèles, divergent dans des sens opposés, le point où ces thalwegs prolongés rencontrent le faîte est nécessairement un minimum (canaux de Crozat et de la Sambre à l'Oise) ;

6° Quand les deux thalwegs ont leurs cours parallèles sur une certaine étendue, mais dirigés en sens contraires, le faîte doit présenter un point minimum dans l'intervalle qui sépare les deux sources (canal du Centre).

396. *Tracé d'une route. Nivellement* (*Int.* 1249 et suivants). Une fois la direction de la route déterminée, d'après les considérations administratives et de géographie physique des n^os^ 594 et 595, il s'agit d'en faire le tracé, c'est-à-dire de déterminer tous les points de son axe compris entre les divers points principaux fixés par la direction.

Pour faire le tracé de la route entre deux points principaux successifs, si de l'un de ces points, ou même d'un point intermédiaire, on peut distinguer toute l'étendue du terrain qui les sépare, on commence par tracer par la pensée l'axe de la route sur le terrain, de manière à avoir les pentes et les contours les plus convenables ; on fixe ainsi à peu près la position de la route par rapport à des arbres, des angles de haies, de murs ou de ruisseaux, ou encore à des grosses pierres faciles à distinguer. Cela fait, on parcourt le terrain afin d'en faire une reconnaissance plus complète, et on détermine, à l'aide de jalons, une ligne, dite *ligne d'opération*, que l'on croit devoir adopter pour axe de la route ; cette ligne s'écarte ordinairement peu de la première ligne que l'on a supposée, étant au point d'observation.

En fixant ainsi la position approchée de la route, on doit rechercher non-seulement à obtenir le chemin le plus court, à diminuer autant que possible les terrassements sans dépasser la pente maximum 0^m^,05 pour les routes affectées spécialement aux voitures de roulage, et à éviter tous travaux dispendieux, mais aussi à se placer sur le sol le meilleur, le moins cher, le mieux exposé au soleil et le plus facile à égoutter après les pluies. Dans un pays de montagnes, la route doit suivre le fond de la vallée, mais à un niveau supérieur aux inondations, ou le faîte de la chaîne, les ondulations des chaînes secondaires (595) se faisant peu sentir près du faîte. Si la route doit descendre du faîte dans la vallée, on suit le versant d'une chaîne secondaire.

Dans un pays uniforme ou très-légèrement accidenté, il est évident que la ligne d'opération doit être droite ; mais si le sol est entrecoupé de montagnes, de rivières, de marais, de lieux bâtis, il faut modifier le tracé droit en ayant égard aux considérations précédentes de commodité, d'économie et de solidité.

Lorsque le terrain n'est que très-légèrement accidenté, pour peu que l'on ait d'habileté, on peut fixer assez convenablement la ligne d'opération pour pouvoir l'adopter comme axe de la route; alors on se contente de faire un nivellement en longueur suivant cette ligne (Int. 1253), de rapporter ce nivellement sur une feuille de papier, en adoptant une échelle convenable et une ligne horizontale de comparaison passant au-dessus du point le plus élevé ou au-dessous du point le plus bas du sol à traverser, et de fixer sur ce profil la position de l'axe de la route par rapport à la surface du sol.

Pour peu que le sol soit accidenté, il ne faut plus s'en rapporter, malgré son habileté, au simple coup d'œil pour fixer la position définitive de l'axe de la route ; on doit faire le plan d'une zone de terrain s'étendant à droite et à gauche de la ligne d'opération, à une distance que ne peut dépasser la route (Int. 1180). Pour cela, on fait en des points de la ligne d'opération, convenablement rapprochés et marqués par des jalons ou piquets numérotés, des profils en travers s'étendant sur toute la largeur de la zone à relever. On rapporte sur le papier, à une échelle convenable, le plan de la ligne d'opération et des profils en travers, en indiquant la distance des profils en travers, ainsi que celle entre eux des différents points de chacun de ces profils ; de plus, en chacun de ces points on place la cote de niveau. C'est à l'aide du plan ainsi formé que, dans son cabinet, on étudie la véritable position de la route. Il convient, aux points principaux de ce plan, d'indiquer la qualité du terrain, sa valeur, le nom du propriétaire, et les difficultés d'exécution que l'on y rencontrera.

Pour être à même de former ce plan, il faut donc avoir déterminé sur le terrain :

1° Le plan de la zone dans laquelle doit se trouver l'axe de la route ;
2° Les distances des piquets de la ligne d'opération, et les cotes du terrain aux points où se trouvent ces piquets ;
3° Les distances des piquets de chacun des profils en travers, et les cotes du terrain aux points où se trouvent ces piquets, par rapport au plan horizontal de comparaison adopté pour le profil en long.

Afin qu'il n'y ait pas confusion, il convient, à mesure que l'on obtient sur le terrain les résultats du nivellement, de les inscrire sur deux tableaux tracés à l'avance, et dont nous allons donner les modèles. Le premier est disposé pour le profil de la ligne d'opération, et le second pour les profils en travers.

1° *Profil en long.*

| NUMÉROS des piquets. 1 | DISTANCES des piquets. 2 | COUPS de niveau. 3 | MOYENNES avant. 4 | MOYENNES arrière. 5 | DIFFÉRENCES positives. 6 | DIFFÉRENCES négatives. 7 | COTES. 8 | OBSERVATIONS. 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. | |
| 1 (*) | » | 1.204<br>1.196 | » | 1.200 | » | » | 100.000 | (*) Position du piquet, nature du sol, difficultés d'exécution, nom du propriétaire, etc. |
| 2 | 38.40 | 1.798<br>1.804 | 1.801 | » | 0.601 | » | 100.601 | |
| | | 1.784<br>1.778 | » | 1.781 | » | » | » | |
| 3 | 32.75 | 2.397<br>2.403 | 2.400 | » | 0.619 | » | 101,220 | |
| | | 0.854<br>0.846 | » | 0.850 | » | » | » | |
| 4 | 28.45 | 2.217<br>2.223 | 2.220 | » | 1.370 | » | 102.590 | |
| | | 1.807<br>1.799 | » | 1,803 | » | » | » | |
| 5 | 29.40 | 0.496<br>0.502 | 0.499 | » | » | 1.304 | 101.286 | *Vérification.* |
| Totaux. | 129.00 | | 6.920 | 5.634 | 2.590 | 1.304 | | 6.920 — 5.634 = 2.590 — 1.304 = 101.286 — 100 = 1.286 |

Pour obtenir les nombres de la 4e et de la 5e colonne, on se place avec le niveau à peu près au milieu de l'intervalle qui sépare deux piquets successifs, et on appelle *coup arrière* le nombre indiqué par le personne qui tient la mire lorsqu'on regarde du côté du point de départ, et *coup avant* le nombre indiqué par la personne qui tient la mire lorsqu'on regarde en avant ; ainsi, dans les exemples du tableau précédent, le niveau étant placé entre les piquets 1 et 2, les coups arrière et avant sont respectivement $1^m,200$ et $1^m,801$ ; entre les piquets 2 et 3, ces coups sont $1^m,781$ et $2^m,400$, etc. Comme chaque coup avant ou arrière se prend deux fois, en tournant la lunette bout pour bout et en amenant le dessus en dessous (Int. 1268), chacun des nombres des 4e et 5e colonnes sont les moyennes des deux nombres correspondants de la troisième colonne.

Les différences entre les nombres de la 4e colonne et ceux de la 5e qui précèdent immédiatement s'écrivent dans la 6e ou la 7e colonne, selon que les premiers nombres sont plus grands ou plus petits que les seconds.

Quant aux nombres de la 8e colonne, qui expriment les distances des différents points du sol où se trouvent les piquets au-dessous du plan horizontal de comparaison, pour le piquet n° 1, on prend la cote 100 mètres, ou tout autre nombre tel que l'horizontale menée à la hauteur qu'il exprime passe au-dessus des plus hautes montagnes que l'on peut avoir à traverser. Pour avoir ensuite les cotes des piquets successifs, à la cote 100 mètres du point de départ ou à la dernière cote obtenue on ajoute la différence correspondante de la 6e colonne, ou on en retranche la différence correspondante de la 7e colonne. Ainsi la cote du 2e piquet est $100{,}000 + 0{,}601 = 100^{m}{,}601$, et celle du piquet n° 5 est $102{,}590 - 1{,}304 = 101^{m}{,}286$.

Ordinairement le tableau précédent est imprimé sur le recto seulement des feuilles d'un registre, et le verso remplace la colonne des observations.

Au lieu de prendre le plan de comparaison au-dessus des points les plus élevés de la surface du sol, on peut le prendre au-dessous des points les plus bas (Int. 1253).

Pour les profils en travers on opère de la même manière que dans le cas précédent, et on dispose les résultats comme l'indique le tableau suivant. La partie droite de ce tableau comprend les piquets $a$, $b$, $c$, etc., de chaque profil, placés à droite de la ligne d'opération ; la partie gauche comprend les piquets $a'$, $b'$, $c'$, etc., placés à gauche de cette même ligne. $a$ et $a'$ sont les premiers piquets à partir de la ligne d'opération, $b$ et $b'$ sont les seconds, et ainsi de suite.

Que l'on soit à droite ou à gauche de la ligne d'opération, on considère comme point de départ, pour chaque côté, le piquet de la ligne d'opération. Il convient de remarquer que cela n'oblige pas de commencer le nivellement par ce piquet, mais qu'il faut se rappeler que le coup arrière se donne toujours en regardant vers ce piquet, et le coup avant en lui tournant le dos. En commençant à une extrémité d'un profil, on ne peut calculer les cotes des piquets que quand on est arrivé au piquet de la ligne d'opération, ce qui est du reste sans inconvénient. (Int. 1275.)

2° *Profils en travers.*

| GAUCHE. | | | | | | PIQUETS de la ligne d'opération ou profils en travers. | DROITE. | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| OBSERVATIONS. | COTES. | COUPS avant. | COUPS arrière. | DISTANCES des piquets. | PIQUETS des profils. | | PIQUETS des profils. | DISTANCES des piquets. | COUPS arrière. | COUPS avant. | COTES. | OBSERVATIONS. |
| | m. 100.00 | m. 1.40 | m. 1.20 | m. 4.00 | | 1 | | m. 3.00 | m. 1.05 | m. 1.50 | m. 100.00 | |
| (*) Nature du terrain, difficultés d'exécution, etc. | 100.20 | 1.70 | 1.24 | 3.46 | $a'$ (*) | | $a$ (*) | 2.50 | 1.00 | 1.50 | 100.45 | (*) Nature du terrain, difficultés d'exécution, etc. |
| | 100.66 | 1.78 | 1.14 | 5.54 | $b'$ | | $b$ | 4.50 | 1.25 | 2.05 | 100.95 | |
| | 101.30 | | | | $c'$ | | $c$ | 3.16 | 1.16 | 1.06 | 101.75 | |
| | | | | | | | $d$ | 5.25 | 1.03 | 2.14 | 101.65 | |
| | | | | | | | $e$ | | | | 102.76 | |
| | 100.60 | 1.55 | 1.33 | 3.17 | | 2 | | 2.46 | 1.14 | 1.74 | 100.60 | |
| | 100.82 | 1.59 | 1.45 | 4.09 | $a'$ | | $a$ | 3.40 | 1.44 | 1.25 | 101.20 | |
| | 100.96 | 1.70 | 1.55 | 5.34 | $b'$ | | $b$ | 6.10 | 1.30 | 1.25 | 101.01 | |
| | 101.11 | | | | $c'$ | | $c$ | | | | 100.96 | |
| | 101.22 | | | | | 3 | | | | | 101.22 | |

On opérerait de la même manière pour le profil 3 et pour tous les autres que pour les profils 1 et 2. Il est à remarquer que les piquets placés sur la ligne d'opération portent les mêmes cotes que sur le tableau du profil en longueur.

*Cotes de points intermédiaires.* Le sol entre deux piquets successifs doit avoir une pente uniforme ; de sorte que, ayant les cotes $c$ et $c'$ de deux piquets successifs A et B, éloignés entre eux de la quantité $d$, la cote $c''$, d'un point intermédiaire situé à la distance $d'$ du piquet A, sera donnée par la formule (Int. 1280).

$$c'' = c + \frac{d'}{d}(c' - c).$$

Si au contraire on voulait avoir la valeur de $d'$ correspondant à une cote donnée $c''$, on aurait

$$d' = d\frac{c'' - c}{c' - c}.$$

A l'aide des résultats des deux tableaux précédents, on établira le plan de la zone de terrain nivelée; on dessinera un profil en long suivant la ligne d'opération, et sur ce profil on rapportera une ligne indiquant la position de l'axe de la route (Int. 1276). Cet axe, d'après sa position par rapport à la surface du sol, donnera un aperçu des quantités de déblais et de remblais à faire, de la distance des transports, et par conséquent des points où il conviendra de modifier le premier profil. Les cotes indiquées sur les profils feront prévoir de combien il convient de reporter l'axe de la route à droite ou à gauche de la ligne d'opération, pour avoir le moins possible de déblais et de remblais, et pour que les déblais compensent les remblais avec la moindre distance de transport. Dans ces modifications du premier profil, il ne faut pas perdre de vue que la route doit toujours offrir un aspect agréable et par conséquent être d'une pente autant que possible uniforme, et avoir le moins possible de contours. Ce n'est que la raison d'économie qui fait s'écarter du premier profil que l'œil a choisi comme réunissant le mieux toutes ces conditions.

Une fois que l'on a obtenu un profil satisfaisant, on l'arrête sur le plan de la zone nivelée par une ligne rouge représentant la position de l'axe de la route. Sur le profil en long, l'axe de la route se représente par une ligne rouge avec un petit liseré rouge, et la surface du sol par une ligne noire avec liseré noir; cette ligne noire est supposée droite entre les différents points nivelés. La ligne figurant le plan horizontal de comparaison, ainsi que celles représentant les cotes des points remarquables du terrain et de la route, se font en lignes noires pointées.

Une fois le profil en long dessiné à une échelle convenable, de $0^m,002$ à $0^m,001$ ou moins encore par mètre pour les longueurs, et de $0^m,005$ à $0^m,01$ pour les cotes du terrain et de l'axe de la route, on fait le dessin des profils en travers, que l'on étend de part et d'autre de l'espace que doit occuper la route. Sur chacun de ces profils on dessine celui de la route, y compris les fossés et les talus. Ces profils, que l'on fait à une échelle de $0^m,005$ à $0^m,01$ pour mètre, se placent ordinairement sur la même feuille que le profil en long, en regard des points qui leur correspondent, ce qui facilite les comparaisons; quelquefois on les dessine sur une feuille séparée, en les éloignant de $0^m,10$ à $0^m,12$, afin d'éviter toute confusion. Comme pour le profil en long, la surface du sol se représente par une ligne noire avec liseré noir, celui de la route et des fossés ou talus par une ligne rouge avec liseré rouge, et la ligne indiquant le plan de comparaison, ainsi que celles représentant les

cotes des points remarquables du profil, par des lignes noires pointées.

Pour dessiner exactement ces derniers profils, il conviendrait de faire de nouveaux nivellements; mais ordinairement on peut les établir à l'aide des cotes fournies par les premiers nivellements.

397. *Cotes rouges. Points et lignes de passage.* On appelle cotes rouges les distances verticales des points de la surface du sol aux points correspondants de la surface du projet. Ainsi l'on déterminera une cote rouge à l'aide d'une simple soustraction, quand on connaîtra les cotes du terrain et du projet au point considéré.

Les cotes des points remarquables du terrain sont données par les nivellements, et celles des points intermédiaires par la formule page 808. Ayant les cotes de la surface du projet, cette même formule servira également à déterminer la cote d'un point intermédiaire.

Si on avait la cote du projet en un point, pour avoir la cote d'un autre point relié au premier par une pente uniforme, et situé à une certaine distance, on ajouterait à la cote du premier point ou on en retrancherait, suivant que la pente irait en descendant ou en montant, le produit de la pente par mètre par la distance horizontale des deux points. Si la pente n'était pas uniforme entre les deux points, on déterminerait successivement les cotes des points intermédiaires d'inflexion, et du dernier de ces points on passerait au point considéré.

On appelle *point de passage*, le point en lequel la ligne du projet rencontre celle du terrain, pour passer de dessus en dessous, ou réciproquement. Ayant les cotes rouges $c$ et $c'$ sur deux verticales A et B reliées par des pentes uniformes et éloignées entre elles d'une distance $d$, on aura la distance $d'$ de la verticale A au point de passage, à l'aide de la formule

$$d' = \frac{d \times c}{c + c'},$$

$d'' = d - d'$ sera la distance du point de passage à l'autre verticale B; on pourrait du reste la calculer de la même manière que $d'$.

Les distances $d$, $d'$ et $d''$ sont comptées ensemble suivant la surface du sol, ou celle du projet, ou encore horizontalement.

Lorsque la surface du projet, après avoir été au-dessous du sol, passe au-dessus, ou réciproquement, elle rencontre la surface de ce dernier suivant une ligne continue que l'on appelle *ligne de passage*. Cette ligne se détermine par points, en cherchant les points de passage qui ont lieu sur différents plans verticaux menés parallèlement à l'axe de la route; ces plans se mènent par tous les sommets des angles rentrants ou saillants des surfaces du sol et du projet (598).

398. *Calculs des déblais et remblais.* Après avoir fixé la position de la route et fait tous les profils en travers, il convient de se rendre compte des volumes de déblais et de remblais qu'exige le projet adopté,

afin de modifier ce projet si les déblais ne compensent pas convenablement les remblais, et de se rendre compte du prix de revient des travaux.

Ce travail, qui n'offre aucune difficulté du reste, exige que l'on procède avec ordre, et que l'on dispose convenablement les différents résultats. Pour cela, on commence par considérer les intervalles des profils consécutifs comme étant indépendants les uns des autres, et on calcule les volumes de déblais et de remblais compris entre deux profils en opérant de la manière suivante :

Soient 1 et 2, fig. 21, pl. III, deux demi-profils consécutifs. On mène des plans verticaux parallèles à l'axe de la route par tous les angles saillants et rentrants que présentent les profils de la route et du terrain. Ces divers plans divisent les cubes, de formes plus ou moins bizarres, de déblais et de remblais, en solides d'une régularité suffisante pour qu'on puisse les évaluer avec une exactitude suffisante.

Après avoir mené ces divers plans, on détermine, s'il y a lieu, c'est-à-dire si ces plans coupent à la fois une partie en déblai et une partie en remblai, les divers points de passage (597), et en réunissant ces points par des droites, on obtient les lignes de passage *iki'lmno* et *pqr* de la surface du projet sur la surface du sol. Cela fait, après avoir préparé le tableau suivant, on considère les solides *a* et *a'* détachés par le premier plan parallèle à l'axe. Le solide *a* est une pyramide, désignée par pyramide *a* dans la deuxième colonne du tableau, qui a pour base sa section *stu* sur le profil 1, et pour volume, cette base multipliée par le tiers de sa hauteur $31^{m},61$, distance du point de passage *k* au profil 1. Le triangle *stu* peut être considéré comme ayant pour hauteur la largeur $1^{m},75$, que l'on place dans la troisième colonne du tableau, et pour base la cote rouge $1^{m},68$; on prend la moitié $0^{m},84$ de cette cote rouge, on l'inscrit dans la quatrième colonne du tableau, et le produit $1^{m},75 \times 0,84 = 1^{m},47$ est la surface de la base de la pyramide (*Int.*, 636); on l'écrit dans la cinquième colonne. On prend le tiers $10^{m},54$ de la hauteur $31^{m},61$ de la pyramide, on inscrit ce tiers dans la sixième colonne du tableau, et le produit $1,47 \times 10,54 = 15^{mc},49$ est le volume de la pyramide (*Int.*, 844); on l'écrit dans la septième colonne. On opère de la même manière pour la pyramide *a'* et pour celles *e'* et *g'*, en plaçant les cubes dans la septième ou la huitième colonne du tableau, selon que la pyramide est en déblai ou en remblai.

Pour le solide se projetant suivant le trapèze *b*, et inscrit trapèze *b* dans la deuxième colonne du tableau, on le considère comme ayant pour base le trapèze *tuvx*. Ce trapèze a pour hauteur la largeur $0^{m},50$, que l'on inscrit dans la troisième colonne, et pour base moyenne la hauteur moyenne $\frac{1,68 + 1,66}{2} = 1^{m},67$, que l'on place dans la quatrième colonne; le produit $0,50 \times 1,67 = 0^{mc},84$ est la surface de la base du

solide $b$ (*Int.*, 640). Pour avoir son volume, on remarque qu'on peut le considérer comme étant équivalent à la moitié d'un prisme ayant même base et une hauteur égale à la moyenne $\frac{31,61+29,20}{2} = 30^{m},405$, ou à un prisme ayant même base et une hauteur égale à $\frac{30,405}{2} = 15^{m},20$, que l'on écrit dans la sixième colonne. Le produit $0,84 \times 15,20 = 12^{mc},69$ est le volume du solide $b$ (*Int.*, 842); on l'inscrit dans la huitième colonne. On opère de la même manière pour cuber les solides $b'$, $c$, $c'$, $d$, $d'$, $e$, $g$, $h$ et $h'$.

Le solide se projetant suivant le rectangle $f$ a une base sur chaque profil, et peut être considéré comme étant équivalent à un prisme ayant pour base la moyenne des bases du solide $f$, et pour hauteur celle de ce solide, c'est-à-dire la distance des deux profils. La base située sur le profil 1 est égale à $1,35\frac{0,68}{2}$, et celle située sur le profil 2, à $1,35\frac{0,35}{2}$; la moyenne de ces surfaces est $1,35\frac{0,68+0,35}{4} = 1,35 \times 0,26 = 0^{mc},35$; on placera donc $1^{m},35$ dans la troisième colonne du tableau, $0^{m},26$ dans la quatrième, $0^{mc},35$ dans la cinquième et 35 mètres dans la sixième; le produit $0^{m},35 \times 35 = 12^{m},29$ est le volume du solide. Si ce solide, au lieu d'avoir des bases triangulaires, avait des bases trapézoïdales ou une base triangulaire et une base trapézoïdale, on opérerait d'une manière semblable; ainsi, les deux bases étant des trapèzes, en représentant les cotes rouges par $a$, $b$, $c$ et $d$, pour une même largeur $1^{m},35$, la base moyenne serait

$$1,35\frac{a+b+c+d}{4}.$$

Si l'une des bases était un triangle, c'est-à-dire si $d$ était nul, la base moyenne serait

$$1,35\frac{a+b+c}{4}.$$

Dans tous les cas, la base moyenne multipliée par la distance des profils donne le cube du solide.

Tous les volumes des déblais et remblais que l'on peut avoir à évaluer peuvent toujours se décomposer en des solides semblables à ceux que nous venons d'examiner, et que nous avons distingués par pyramides, trapèzes et rectangles.

*TABLEAU des calculs des déblais et remblais.*

| PROFILS comprenant les solides. | INDICATION des solides. | BASES ou profils des solides. | | | LONGUEURS des solides. | CUBES | | OBSERVATIONS. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Largeur. | Hauteur. | Surface. | | en déblai. | en remblai. | |
| | | m. | m. | m. c. | m. | m. c. | m. c. | |
| 1 | Pyramide *a*. | 1.75 | 0.84 | 1.47 | 10.54 | 15.49 | | Nature du sol, etc. |
| | Pyramide *a'*. | 0.75 | 0.09 | 0.07 | 1.13 | » | 0.08 | |
| | Trapèze *b*. . . | 0.50 | 1.67 | 0.84 | 15.20 | 12.69 | » | |
| | Trapèze *b'*. . | 0.50 | 0.26 | 0.13 | 2.30 | » | 0.30 | |
| | Trapèze *c*. . | 0.45 | 1.43 | 0.64 | 13.57 | 8.73 | » | |
| | Trapèze *c'*. . | 0.45 | 0.38 | 0.17 | 3.93 | » | 0.67 | |
| | Trapèze *d*. . | 0.70 | 1.17 | 0.82 | 13.46 | 11 00 | » | |
| | Trapèze *d'*. . | 0.70 | 0.34 | 0.24 | 4.04 | » | 0.96 | |
| | Trapèze *e*. . | 0.95 | 0.92 | 0.88 | 15.94 | 14.03 | » | |
| | Pyramide *e'*. . | 0.95 | 0.43 | 0.42 | 2 08 | » | 0.25 | |
| | Rectangle *f*. . | 1.35 | 0.26 | 0.35 | 35.00 | 12.29 | » | |
| | Trapèze *g*. . . | 1.70 | 0.58 | 0.99 | 12.99 | 12.81 | » | |
| | Pyramide *g'* . | 1.70 | 0.43 | 0.73 | 6.01 | » | 4.39 | |
| | Trapèze *h*. . | 1.30 | 0.70 | 0.91 | 6.74 | 6.13 | » | |
| | Trapèze *h'*. . | 1.30 | 1.18 | 1.53 | 10.76 | » | 16.51 | |
| 2 | Totaux. . . . . | | | | . . . | 93.17 | 23.16 | |

On continuerait de la même manière pour l'autre portion comprise entre les profils 1 et 2. On ne ferait les totaux qu'après avoir calculé tout ce qui sépare deux profils, et on continuerait le tableau pour ce qui est intercepté par les profils 2 et 3, puis 3 et 4, et ainsi de suite.

**399.** *Méthode expéditive pour calculer les déblais et remblais.* A moins qu'il ne s'agisse de volumes considérables ou d'un sol difficile à attaquer, on peut généralement suivre la méthode que nous allons exposer :

1° La route étant complétement en déblai ou en remblai sur les deux profils, le volume D de déblai ou R de remblai se calcule, comme pour le solide désigné par rectangle *f*, dans la méthode précédente, c'est-à-dire en considérant ce volume comme étant équivalent à celui d'un prisme droit ayant pour hauteur la distance des deux profils, et pour base une moyenne arithmétique entre les surfaces des deux profils.

Ainsi, S étant la surface d'un profil, *s* la surface de l'autre profil et *d* la distance de ces profils, on a

$$\text{D ou R} = \frac{\text{S} + s}{2} d.$$

Il n'est pas nécessaire que les déblais ou remblais aient la même largeur sur les deux profils.

2° Si la surface S d'un des profils était complétement en remblai et celle $s$ de l'autre profil complétement en déblai, on supposerait que la distance moyenne $d'$ de la ligne de passage à l'un des profils, à celui en remblai, par exemple, est donnée par la formule du n° 597, dans laquelle les cotes rouges $c$ et $c'$ sont remplacées par les surfaces S et $s$; on aurait

$$d' = \frac{d \times S}{S + s}.$$

La distance moyenne $d''$ de la ligne de passage à l'autre profil peut se calculer de la même manière que $d'$, mais on l'obtient en remarquant que l'on a $d'' = d - d'$.

Ayant $d'$, on calculerait le cube R du remblai de la même manière que celui du solide désigné par trapèze $b$ dans la méthode précédente (page 811), c'est à-dire en le considérant comme étant équivalent à la moitié d'un prisme ayant même base S et même hauteur $d'$, ou encore à un prisme ayant S pour base et $\frac{d'}{2}$ pour hauteur; ainsi, on aurait

$$R = S \frac{d'}{2}.$$

Pour les mêmes raisons, on aurait

$$D = s \frac{d''}{2}.$$

3° Si l'un des profils était complétement en déblai ou en remblai, et que l'autre fût partie en remblai et partie en déblai, par le point de rencontre des remblais et des déblais sur ce dernier profil, on mènerait un plan parallèle à l'axe de la route; ce plan diviserait ce qui sépare les deux profils en deux parties : l'une complétement en déblai ou en remblai, et que l'on évaluerait comme au 1°; l'autre en déblai sur un profil et en remblai sur l'autre, et que l'on évaluerait comme au 2°.

4° Si les profils étaient tous deux partie en déblai et partie en remblai, mais que les parties en déblai et en remblai fussent correspondantes sur les deux plans, sans pour cela avoir la même largeur, on calculerait le cube des déblais, ainsi que celui des remblais, comme au 1°.

5° Enfin, si les profils comprennent des parties en déblai et des parties en remblai, mais ne se correspondant pas sur les deux profils, ce qui est le cas de la figure 21, planche III, pour lequel nous avons formé le tableau page 813, on considère la première surface $s$ du profil 1, qui est en déblai, et la première surface S du profil 2, qui est en remblai, et on calcule les cubes de déblai et de remblai qui correspondent à ces surfaces comme au 2°. Considérant ensuite la seconde surface S' du profil 1, qui est en remblai, et la seconde surface $s'$ du profil 2, qui est en déblai, on calcule également le déblai et le remblai comme au 2°.

Afin de donner une idée de la marche à suivre pour calculer les déblais et remblais, et de la manière de disposer les résultats dans les différents cas que nous venons d'examiner, nous allons former le tableau suivant pour le cas du 5e, c'est-à-dire pour la figure 21.

On considère d'abord la partie qui correspond aux premières surfaces $s$ et S; c'est ce que l'on indique dans la deuxième colonne du tableau. On calcule ensuite la surface en déblai $s$ en évaluant, d'après les largeurs interceptées entre les différentes cotes rouges menées aux points remarquables du projet et du sol, et les valeurs de ces cotes, les surfaces partielles interceptées par ces cotes; les largeurs partielles s'inscrivent dans la troisième colonne du tableau; dans la quatrième colonne, on place les cotes rouges, ou mieux les valeurs par lesquelles il faut multiplier les largeurs pour avoir les surfaces partielles; ces surfaces partielles s'inscrivent dans la cinquième colonne. La surface totale $s = 5^{mc},10$ s'inscrit au bas des surfaces partielles. On calcule de la même manière la surface en remblais $S = 0^{mc},73$.

Ayant les surfaces des déblais et des remblais, la distance moyenne $d'$ de la ligne de passage au profil 1 est, d'après ce qui a été dit au 2e, et $d$ étant égale à 35 mètres,

$$d' = \frac{35 \times 5,10}{5,10 + 0,73} = 30^{m},62.$$

$\frac{30^{m},62}{2} = 15^{m},31$ est la longueur du prisme droit ayant $s$ pour base, et dont le volume est équivalent à celui du déblai; on inscrit $15^{m},31$ dans la sixième colonne du tableau.

Le cube du déblai est $5,10 \times 15,31 = 78^{m.cub.},08$; on l'écrit dans la septième colonne.

La distance moyenne $d''$ de la ligne de passage au profil 2 est $35 - 30,62 = 4^{m},38$, dont la moitié est $2^{m},19$, nombre que l'on pose à la sixième colonne.

Le cube de remblai est alors $0,73 \times 2,19 = 1^{m.cub.},60$, nombre que l'on inscrit dans la huitième colonne.

En opérant de la même manière entre S' et $s'$, on trouve que le volume du remblai y est $20^{mc},23$, et celui du déblai $18^{mc},13$.

Faisant les totaux des cubes en déblai et des cubes en remblai, on trouve respectivement $96^{mc},21$ et $21^{mc},83$, nombres différant peu de ceux $93^{mc},17$ et $23^{mc},16$ trouvés par la méthode exacte (tableau page 813).

| PROFILS comprenant les solides. | INDICATION des solides. | BASES ou profils des solides. Largeurs partielles. | Hauteurs. | Surfaces. | LONGUEURS réduites. | CUBES en déblai. | CUBES en remblai. | OBSERVATION. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | m. | m. | m. | | | | |
| 1 | De *s* en S. | 1.75 | 0.84 | 1.47 | | | | |
| | | 0.50 | 1.67 | 0.84 | | | | |
| | | 0.45 | 1.43 | 0.64 | | | | |
| | | 0.70 | 1.17 | 0.82 | | | | Nature du terrain, etc. |
| | | 2.30 | 0.58 | 1.33 | | | | |
| | | Surf. en déblai *s*. | | 5.10 | m. 15.31 | m. 78.08 | | |
| | | 1.70 | 0.22 | 0.37 | | | | |
| | | 1.65 | 0.22 | 0.36 | | | | |
| | | Surf. en remblai S. | | 0.73 | 2.19 | | m. 1.60 | |
| | De S′ en *s*′. | 3.00 | 0.75 | 2.25 | | | | |
| | | Surf. en remblai S′. | | 2.25 | 8.99 | | 20.23 | |
| | | 3.05 | 0.40 | 1.22 | | | | |
| | | 1.30 | 0.70 | 0.91 | | | | |
| | | Surface en déblai *s*′. | | 2.13 | 8.51 | 18.13 | | |
| 2 | | Totaux. . . . . | | | | 96.21 | 21.83 | |

**600.** *Méthode approximative pour calculer les déblais et remblais lors de l'étude du projet.* Dans ce cas, afin d'abréger les calculs, on ajoute la surface totale en déblai sur un profil à la surface totale en déblai sur l'autre profil; cette somme, multipliée par la demi-distance des profils, donne le volume du déblai; on calcule de la même manière le cube du remblai. On voit que dans cette méthode les solides s'arrêtant à des lignes de passage sont supposés se prolonger d'un profil à l'autre, ce qui tend à donner des volumes plus forts; mais il vaut mieux obtenir des volumes péchant en plus qu'en moins.

**601.** *Calcul des déblais et remblais dans les parties courbes.* Dans ce cas, on opère de la même manière que pour une partie droite; seulement, au lieu de partager les déblais et remblais par des plans verticaux parallèles à l'axe, on les divise par des surfaces cylindriques verticales engendrées par une droite verticale qui se meut en s'appuyant sur des courbes concentriques à l'axe de la route. C'est sur ces direc-

trices que se mesurent les distances des profils, et que l'on calcule les points et les lignes de passage.

*Rayon des courbes.* Sur une route, le rayon minimum de la courbe de raccordement passant par l'axe varie de 20 à 25 mètres. Cela suffit à la circulation, sur une chaussée de 5 mètres, d'une voiture de 23 mètres de longueur, attelage compris, et de $1^{m},80$ de largeur comptée de dehors en dehors du bandage des roues. Ce rayon varie ordinairement de 50 à 100 mètres.

**602.** *Évaluation des distances de transport.* La dépense occasionnée par les terrassements dépend non-seulement des volumes de déblais et de remblais, mais aussi de la distance de transport, distance que l'on doit par conséquent chercher à diminuer autant que possible, en suivant des chemins convenables.

La distance moyenne de transport ne peut être moindre que la distance du centre de gravité du déblai à celui du remblai; elle est souvent plus grande, quand, par exemple, on est assujetti à faire passer les chemins de transport en des points déterminés, et aussi dans les cas analogues à celui où le déblai est pris au centre du remblai. Dans les cas ordinaires de la pratique, on peut prendre comme distance moyenne de transport la distance des centres de gravité.

Il existe plusieurs méthodes pour se rendre compte des dépenses du transport dans un projet de route ou de chemin de fer ou de canal, mais la plus exacte, celle qui rend le mieux compte de tous les détails du transport, est la méthode graphique que nous allons exposer.

Soient 1, 2 et 3, fig. 22, planche III, trois profils successifs, entre lesquels il s'agit de se rendre compte de la nature du transport des terres. Pour cela, on trace une ligne indéfinie AB; sur cette ligne, on prend des points $a$, $b$, $c$ espacés entre eux de quantités proportionnelles aux écartements des profils; ces écartements se prennent à une échelle de $0^{m},001$ à $0^{m},002$ pour mètre ou même à une échelle plus grande, afin de pouvoir mesurer assez approximativement les distances, ce qui dispense, dans divers cas, de faire des calculs assez longs. Aux points $a$, $b$, $c$ on mène des perpendiculaires à AB, au-dessus et au dessous de cette ligne; sur ces perpendiculaires, au-dessus de AB, on prend, à une échelle de $0^{m},005$ pour mètre, des longueurs proportionnelles aux surfaces en déblai des profils correspondants; sur ces mêmes perpendiculaires, on prend, en dessous de AB, et à la même échelle, des longueurs proportionnelles aux surfaces en remblai des profils.

Ainsi, sur le profil 1, la surface en déblai étant $15^{mc},50$, et la surface en remblai $8^{mc},46$, on prend $ad$ égal à une longueur représentant $15^{m},50$, et $ae$ égal à $8^{m},46$. Sur le profil 2, les surfaces en déblai et en remblai étant respectivement $7^{mc},40$ et $3^{mc},50$, on prend $bf = 7^{m},40$ et $bg = 3^{m},50$.

Le volume du déblai compris entre les profils 1 et 2 étant égal à la

demi-somme de ses surfaces sur ces profils, multipliée par la distance des profils, il est égal à $\frac{15,50+7,40}{2}\times 30 = 343^{mc},50$, valeur qui est représentée en mètres carrés par l'aire du trapèze *abfd*. Par la même raison, le volume du remblai compris entre les profils 1 et 2 est égal à $\frac{8,46+3,50}{2}\times 30 = 179^{mc},40$, c'est-à-dire qu'il est représenté par l'aire du trapèze *abge*.

Prenant $ci = 3^{m},62$, et joignant *fi*, le point *k* représente la position moyenne de la ligne de passage de la partie en déblai du profil 2 et de la partie correspondante en remblai du profil 3. Le volume du déblai est représenté par l'aire du triangle *bkf* et celui du remblai correspondant, par celle du triangle *cik*. L'autre partie de remblai comprise entre les profils 2 et 3 est représentée par le trapèze *bchg*; de sorte que construisant *hlk'* équivalent au triangle *cik*, ce qui se fait simplement en prenant $hl = ci$, l'aire du polygone *bclk'g* représente le volume total de remblai compris entre les profils 2 et 3.

D'abord, on a (n^os^ 597 et 599) $bk = \frac{50\times 7,40}{7,40+3,62} = 33^{m},57$, et par suite $kc = 50 - 33,57 = 16,43$. L'aire du triangle *bkf* est alors $\frac{7,40\times 33,57}{2} = 124^{mc},21$, ce qui représente le cube du déblai compris entre les profils 2 et 3.

On a

$$kk' = bg + (ch - bg)\frac{bk}{bc} = 3,50 + (10,40 - 3,50)\frac{33,57}{50} = 8^{m},13.$$

L'aire du trapèze $bkk'g = \frac{3,50+8,13}{2}33,57 = 195^{m},38$; celle du trapèze $kclk' = \frac{8,13+14,02}{2}\times 16,43 = 182,05$, et par suite la surface du polygone *bclk'g* est égale à $195,38 + 182,05 = 377^{mc},43$, valeur qui exprime le cube total de remblai compris entre les profils 2 et 3.

Examinons maintenant de quelle manière les déblais seront employés pour faire les remblais. Entre les profils 1 et 2, si l'on prend $am = ae$ et $bn = bg$, on voit que la partie *abnm* du déblai sera employée pour faire le remblai *abge*, sans aucun transport, suivant la longueur de la route, mais que le restant de remblai, représenté par le trapèze *mnfd*, et qui est par conséquent égal à $343,50 - 179,40 = 164^{mc},10$, devra être transporté entre les profils 2 et 3, et peut-être plus loin. Les parties qui se compensent sans transport longitudinal se distinguent dans la figure par un liséré en hachures.

Entre les profils 2 et 3, le triangle en déblai *bkf* se place directement sur le triangle *bko*, ou mieux sur le polygone *bko'g*, en faisant le trian-

gle *ko'p* équivalent au triangle *opg*. Il reste donc entre ces deux profils un excès de remblai représenté par le polygone *kclk'o'*. Comme ce polygone est la différence entre le polygone *bclk'g* et le triangle *bkf*, l'excès de remblai est donc $377,43 - 124,21 = 253^{mc},22$; ainsi, les $164^{mc},10$ d'excès de déblai entre les profils 1 et 2 seront employés à remblayer entre 2 et 3, et il restera encore un excès de remblai égal à $253,22 - 164,10 = 89^{mc},12$ Cet excès est représenté par le trapèze *clqr*, dont il faut d'abord déterminer les dimensions *rc* et *rq*.

Lorsque le point *r* est en *c*, on a $rq = cl$, et lorsqu'il est en *k*, on a $rq = kk'$; ainsi pour un avancement $ck = 16,43$, *cq* a diminué de $cl - kk' = 14,02 - 8,13 = 5^{m},89$, ce qui fait $0^{m},36$ par mètre. Cela étant, on a

$$89,12 = rc\,\frac{14,02 + 14,02 - rc \times 0,36}{2},$$

équation de laquelle on peut tirer directement la valeur de *rc*; mais il est plus commode de déterminer cette valeur par tâtonnement : la surface du trapèze *clqr* et la valeur de *cl* font juger quelle sera à peu près la valeur de *rc*; ainsi, dans ce cas, elle différera peu de $6^{m},5$; remplaçant dans le second facteur du deuxième membre de l'équation précédente *rc* par cette valeur, on a

$$89,12 = rc\,\frac{14,02 + 14,02 - 6,5 \times 0,36}{2}, \quad \text{d'où} \quad rc = 6^{m},94.$$

Cette valeur étant substituée à son tour dans l'équation, on conclut $rc = 6^{m},98$, valeur différant très-peu de la précédente et que l'on peut adopter dans la pratique.

On a

$$kr = 16,43 - 6,98 = 9^{m},45, \quad \text{et} \quad rq = 14,02 - 0,36 \times 6,98 = 11^{m},51.$$

Au lieu de déterminer directement la valeur de *rc*, on aurait pu déterminer celle de *kr*, en remarquant que la surface du trapèze *krqk'* est la différence entre les deux trapèzes *kclk'* et *rclq*, c'est-à-dire égale à

$$182,05 - 89,12 = 92^{m},93,$$

et que

$$rq = kk' + 0,36 \times kr.$$

Examinons maintenant quelle sera la distance moyenne à parcourir pour transporter le déblai représenté par le trapèze *mnfd* sur l'espace occupé par le remblai figuré par le pentagone *krqk'o'*. Cette distance est égale à celle des centres de gravité de ces polygones, mesurée suivant AB.

E étant le centre de gravité du trapèze *mnfd*, on peut déterminer *Ef'* en décomposant ce trapèze en deux triangles, mais on a directement (*Int.*, 1445)

$$Ef' = \frac{ab(nf + 2md)}{3(nf + md)} = \frac{30(3{,}90 + 2\times 7{,}04)}{3(3{,}90 + 7{,}04)} = 16^{m},43.$$

De même, H étant le centre de gravité du trapèze $rqk'k$, on a

$$H'T = \frac{kr(kk' + 2rq)}{3(kk' + rq)} = \frac{9{,}45\,8{,}13 + 2\times 11{,}51)}{3(8{,}13 + 11{,}51)} = 5 \text{ mètres.}$$

Il faut maintenant déterminer à quelle distance de $kk'$ se trouve le centre de gravité L du triangle $kk'o'$. La surface de ce triangle est égale à celle du trapèze $bkk'g$ moins celle du triangle $bkf$, c'est-à-dire à $195{,}38 - 124{,}21 = 71^{mc},17$ ; la base $kk'$ de ce triangle étant $8^{m},13$, sa hauteur est $\frac{71{,}17}{4.065} = 17^{m}.51$. On a donc $LT = \frac{17{,}51}{3} = 5^{m},84$, et par suite $LH' = 5{,}00 + 5{,}84 = 10^{m},84$.

Le centre de gravité du pentagone $krqk'o$ se projette entre L et H', à des distances de ces points qui sont en raison inverse des surfaces du triangle $kk'o'$ et du trapèze $krqk'$, de sorte qu'on a

$$H'P = \frac{10{,}84 \times 71{,}17}{71{,}17 + 92{,}93} = 4^{m},70,$$

et

$$TP = 5{,}00 - 4{,}70 = 0^{m},30.$$

La distance moyenne de transport est alors

$$Ef' + bk + TP = 16{,}43 + 33{,}57 + 0{,}30 = 50^{m},30.$$

Tous ces calculs peuvent être abrégés en faisant la figure à une échelle plus grande, ce qui permet, lorsqu'on n'a pas besoin d'une évaluation rigoureuse, de prendre les longueurs à l'échelle sans les calculer, et même de fixer à vue d'œil la position des centres de gravité.

A l'aide du dessin des profils et d'un des tableaux pages 813 et 816 on peut se rendre compte exactement des quantités de terre à transporter longitudinalement, et plus ou moins approximativement de la distance moyenne de transport, sans qu'il soit nécessaire de faire le tableau graphique.

**603.** *Influence des rampes sur les distances de transport.* Il est évident qu'une rampe ascendante du déblai au remblai augmente le travail, puisque, outre le travail dépensé pour le transport horizontal, il faut encore élever les matériaux. Des ingénieurs admettent que le travail est le même pour monter une rampe de 20 mètres de base sur $2^{m},50$ de hauteur (inclinée au 1/8), que pour parcourir une distance horizontale de 30 mètres. La pente 1/8 exigeant un travail au-dessus des forces de l'homme, il convient d'adopter, comme dans les travaux du génie militaire, une rampe au 1/12, et de considérer comme équivalent de la distance horizontale 30 mètres, une rampe de 20 mètres

de base sur $1^m,65$ de hauteur. Ainsi, considérant que pour s'élever de la hauteur H il faut parcourir une rampe de 12 H de base, comme 20 mètres de cette rampe équivalent à 30 mètres de transport horizontal, un mètre équivaut à $1^m,50$ et les 12 H à 12 H $\times$ 1,50 = 18H, ce qui revient à ajouter 6H à l'espace réellement parcouru horizontalement, sans que cet espace horizontal soit jamais inférieur à 12 H; dans le cas où un chemin direct donnerait un espace moindre, on adopterait un chemin composé de deux, ou plus si cela était nécessaire, de directions se raccordant de manière que l'ouvrier pût facilement passer de l'une à l'autre avec sa brouette.

Soit ABCD, figure 23, planche III, une fouille dont les terres sont destinées à former le cavalier EFHI, G le centre de gravité de la fouille, G' celui du remblai et $h$, $h'$ les distances verticales de ces centres de gravité à l'horizontale AI. Pour amener au point D les terres de la fouille, il faut développer le même travail qui si toute la masse était concentrée au point G; par conséquent le travail développé est le même que pour transporter la masse à une distance horizontale égale à 18 $h$; par la même raison, le travail développé pour amener les terres depuis le point E jusqu'aux différents points du cavalier est le même que pour parcourir un espace horizontal égal à 18 $h'$; le travail total produit équivaut donc à un transport horizontal à une distance 18 $(h + h')$ + DE. On est obligé de laisser des rampes pour élever les terres, soit de l'intérieur de la fouille au point D, soit du point E aux différents points du cavalier; comme ces rampes sont ordinairement espacées de 20 mètres entre elles, il en résulte que chacune d'elles reçoit les terres jusqu'à une distance de 10 mètres de chaque côté; ce qui exige encore, pour toute la masse, un transport horizontal à une distance moyenne de 5 mètres, et comme ce transport se reproduit pour former le cavalier comme pour faire la fouille, il en résulte que l'accroissement total de la distance de transport est de 10 mètres; par conséquent la distance totale de transport est 18 $(h + h')$ + DE + 10 mètres.

Soit, même figure, DK et EL deux lignes inclinées au 1/12. Si le sol permet partout la circulation de la brouette, on pourra enlever la portion AKD sans s'astreindre à venir passer sur des rampes espacées de 20 mètres, ce qui diminuera, pour cette portion, la distance de transport de 5 mètres; on peut produire la même diminution sur le cavalier pour la partie EIL; cette considération n'est pas à négliger quand la fouille est très-large et peu profonde. Quoi qu'il en soit, comme il y a avantage de suivre des rampes, surtout sur les terres remuées, parce que le sol y prenant de la consistance le transport y devient plus facile, dans les circonstances ordinaires du transport en pente, on prend pour distance horizontale de transport 18 fois la différence de niveau des centres de gravité de la fouille et du remblai, plus la distance du bord

de la fouille au pied du cavalier, plus encore 10 mètres pour le transport normal aux rampes; de sorte que dans l'exemple précédent, V étant le cube de terre transporté, le travail produit peut être exprimé par $V\,[18\,(h+h')+DE+10]$.

Si le sol allait en s'élevant de A vers I, $h+h'$ exprimerait, comme dans le cas d'un sol horizontal, la différence de niveau des centres de gravité G et G'; si au contraire le sol allait en s'abaissant de A vers I, on remplacerait 18 $(h+h')$ par la somme de la distance horizontale du centre de gravité G au point D et de celle du centre de gravité G' au point E, augmentée de 6 fois la distance verticale du point D au-dessus du centre de gravité G, plus 6 fois la différence positive de niveau du centre de gravité G' et du point E; c'est également la valeur que l'on substituerait à 18 $(h+h')$ dans le cas où les lignes GD et G'E seraient inclinées à moins de 1/12; dans ce dernier cas on augmenterait la valeur de DE de 6 fois la hauteur verticale du point E au-dessus de D.

Dans les différents cas que nous venons d'examiner, nous avons tenu compte de l'excès de travail dû à une rampe ascendante; mais nous avons négligé l'effet d'une rampe descendante. Dans le transport à la brouette, comme l'ouvrier fatigue peut-être un peu moins en descendant, mais qu'il fatigue beaucoup plus en remontant, à vide il est vrai, la pente descendante ne peut être très-favorable; mais dans le transport au moyen du camion, du tombereau ou du wagon, cas où le moteur ne porte pas la majorité de la charge comme avec la brouette, il convient de tenir compte de l'inclinaison (593).

**604.** *Exécution des fouilles.* Il n'y a guère que des expériences directes qui permettent d'évaluer le prix à assigner à un volume déterminé de fouille; ainsi il y a des terres qui sont attaquées facilement avec la bêche ordinaire ou le louchet, d'autres ne le sont qu'avec la pioche, et de plus dures, avec le pic; les rocs exigent l'emploi des outils du carrier et quelquefois celui de la poudre.

La terre végétale, le sable et la tourbe sont les seules matières que partout on peut attaquer à peu près aussi facilement avec la bêche ou le louchet; on admet qu'un ouvrier peut facilement en fouiller et charger dans des brouettes 15 mètres cubes par jour de 10 heures de travail. On admet également qu'un ouvrier peut jeter ces mêmes cubes à 3 ou 4 mètres de distance horizontale, ou à une hauteur verticale de $1^m,65$; cependant ce dernier travail étant un peu plus fatigant, il y a lieu de le payer un peu plus cher.

Dans les travaux du génie militaire, si un homme suffit pour charger une brouette pendant qu'un homme parcourt un relais horizontal de 30 mètres, on dit que la *terre* est *à un seul homme;* si un homme ne suffit pas, et que, par exemple, pour deux meneurs il faille deux chargeurs et un piocheur, la *terre* est *à un homme et demi;* la *terre* peut

être *à deux, à trois, etc. hommes.* On conçoit que les prix doivent être différents pour ces diverses espèces de terre.

Afin de se rendre bien compte de la catégorie à laquelle appartient la terre que l'on a à fouiller lorsqu'il s'agit de fixer le prix à accorder aux entrepreneurs, on fait piocher un certain volume de terre, en l'amenant à l'état de pouvoir être chargée à la pelle, par un ouvrier que choisit la partie qui doit faire exécuter, et on fait charger cette terre par un ouvrier qui reçoit, lui, ses instructions de l'entrepreneur. Si T est le temps qu'a mis le premier ouvrier pour piocher, et que $t$ soit celui qu'emploie le second pour charger la même terre, il en résulte que $\frac{T}{t}$ est le nombre des piocheurs nécessaires pour entretenir un chargeur ; il faudra donc avoir $\frac{T}{t}+1=\frac{T+t}{t}$ ouvriers à la fouille pour occuper un meneur d'une manière continue ; par conséquent la *terre* est *à* $\frac{T+t}{t}$ *hommes.* Il est à remarquer que dans cette expérience chacune des parties intéressées fournissant l'ouvrier qui travaille dans le sens de ses intérêts, l'une et l'autre ont sujet d'être satisfaites.

**603.** *Transport des terres.* Le transport des terres se fait en les jetant à la pelle lorsque la distance n'est que de quelques mètres (604) ; mais lorsqu'elle est plus considérable, on fait usage de brouettes, de camions, de tombereaux, de bourriquets, et de wagons roulant sur rail-ways (439).

1° *Transport à la brouette.* La capacité des brouettes varie ordinairement de 1/25 à 1/33 de mètre cube. Quant à la charge en terre, elle varie de 60 à 100 kilog., et elle est habituellement de 70 kilog.

Dans un chantier bien organisé, il ne faut pas que des ouvriers soient inoccupés pendant que les autres travaillent. Pour une terre facile, un ouvrier chargeant 15 mètres cubes de terre en 10 heures de travail, c'est-à-dire en 36000 secondes, pour charger une brouettée de $0^m,03$ cubes, il emploiera $\frac{36\,000\times 0,03}{15}=72''=1'12''$.

Un meneur parcourant 30 000 mètres dans une journée de 10 heures de travail, c'est-à-dire en 36000″, en 72″ il parcourra une distance de $\frac{30\,000\times 72}{36\,000}=60$ mètres. Comme cette distance comprend une allée et une venue, il en résulte que l'étendue d'un relais ne sera que de 30 mètres ; c'est l'étendue généralement adoptée, et qui paraît la plus favorable au travail. Cependant, comme il y a des cas où le relais ne peut être réglé à 30 mètres, celui, par exemple, où la distance de transport est moindre que 60 mètres, alors on règle la capacité de la brouette d'après la distance à parcourir ; ainsi le relais étant de 50 mètres, ce qui fait une distance de 100 mètres pour l'allée et la venue,

l'ouvrier parcourant toujours 30 000 mètres en 10 heures, il parcourra un relais en $\frac{36\,000 \times 100}{30\,000} = 120'' = 2'$; pendant ce temps, le chargeur placera dans la brouette $\frac{15 \times 2}{600} = 0{,}05 = 1/20$ de mètre cube de terre, contenu dont la brouette devra être capable. Par un calcul semblable, on trouverait que le relais étant de $28^{m}{,}50$, le contenu de la brouette ne doit être que de 1/35 de mètre cube.

En nous plaçant dans les conditions ordinaires, un ouvrier transportant dans sa journée de dix heures 15 mètres cubes de terre à une distance de 30 mètres, il en résulte que si sa journée lui est payée 1 fr. 50 cent, le prix du transport d'un mètre cube à 30 mètres sera de 0 fr. 10 cent.; à 60 mètres il faudrait un second rouleur, et le prix deviendrait 0 fr. 20 cent; à 90 mètres, ce prix serait 0 fr. 30 cent., et ainsi de suite, le prix croissant comme la distance. Si l'on voulait avoir le prix total de la fouille et du transport, il suffirait d'ajouter à chacun des prix précédents le 1/15 de la journée de l'homme ou des hommes qui, employés à la fouille, entretiennent le rouleur.

2° *Transport au camion.* Le camion est un petit tombereau ordinairement traîné par trois hommes, et pouvant contenir alors $0^{mc}{,}20$ de terre.

S'il n'y avait pas de temps d'arrêt, le camion parcourrait 30 000 mètres en 10 heures, et comme il faut compter sur 50 à 60″, soit $0^{h}{,}02$ pour s'atteler au camion, le décharger et le remettre en marche, il en résulte que le temps employé pour transporter le contenu $0^{m.cub.}{,}20$ du camion à une distance de 30 mètres est

$$0{,}02 + \frac{10 \times 30 \times 2}{30\,000} = 0_{h}{,}04.$$

Pour transporter un mètre cube à la même distance, il faudra donc

$$\frac{0{,}04 \times 1}{0{,}2} = 0^{h}{,}2.$$

Si la distance de transport est de 60 mètres, le transport d'un camion exigera

$$0{,}02 + \frac{10 \times 60 \times 2}{30\,000} = 0^{h}{,}06,$$

ce qui fait $\frac{0{,}06}{0{,}2} = 0^{h}{,}3$ par mètre cube.

A une distance de 90 mètres, ces temps seraient respectivement $0^{h}{,}08$ et $0^{h}{,}4$.

Supposant, comme avec la brouette, que chaque ouvrier gagne 1 fr. 50, ce qui fait 4 fr. 50 pour la journée des trois rouleurs, ou 0 fr. 45 par heure, il en résulte que le prix du transport d'un mètre

cube à 30, 60, 90 mètres est respectivement $0^{f},09$, $0^{f},135$ et $0^{f},18$; ce qui montre que l'avantage du camion sur la brouette croît avec la distance. Ces prix font voir aussi que, même à 30 mètres, il y a avantage à employer le camion au lieu de la brouette (1°); cependant on n'en fait pas usage pour des distances de moins de 100 mètres.

Un ouvrier chargeant 15 mètres cubes de terre en 10 heures, deux ouvriers mettront $\frac{10 \times 0,2}{15 \times 2} = 0^{h},067$ pour charger le contenu $0^{mc},2$ du camion. Ce temps, comparé à celui de $0^{h},08$ que mettent les rouleurs pour parcourir un relais de 90 mètres, fait voir que pour une terre aussi facile on pourrait à la rigueur fixer le relais à moins de 90 mètres; cependant il convient de le fixer à 100 mètres, afin de soulager les chargeurs, qui fatiguent évidemment plus pour jeter la terre sur un camion que sur une brouette.

3° *Transport au tombereau.* Pour transporter les terres à une grande distance, on fait usage de tombereaux, qui sont ordinairement attelés d'un cheval et ont alors une capacité de $0^{mc},50$; dans quelques localités on les fait plus grands; ainsi à Paris on en voit qui cubent de $1^{m},00$ à $1^{m},50$, et qui sont le plus souvent traînés par deux chevaux.

Le temps nécessaire au transport au tombereau peut se diviser en trois parties distinctes :

1° *Le temps nécessaire au chargement.* En supposant toujours qu'un homme puisse charger 15 mètres cubes de terre en 10 heures de travail (dans le plus grand nombre de cas, il convient de réduire ce nombre à 12 mètres cubes), si l'on représente par C la capacité du tombereau, et par N le nombre des chargeurs, ce temps sera $\frac{10 \times C}{15 \times N}$. Le nombre N ne doit pas dépasser 3, car autrement, les chargeurs se gêneraient, et il comprend le conducteur, qui travaille comme chargeur.

2° *Le temps nécessaire au mouvement.* Un cheval attelé à un tombereau parcourant 30 000 mètres en 10 heures, pour parcourir R relais de 30 mètres, il mettra $R \frac{10 \times 60}{30000} = R \times 0.02$ heures.

3° *Le temps employé au déchargement et à la mise en marche du tombereau.* Ce temps est évalué à $0^{h},033$.

Ayant ces différents temps pour une capacité C de tombereau, pour avoir ceux nécessaires au transport d'un mètre cube de terre, il suffit de multiplier ces premiers par le rapport d'un mètre cube à la capacité C, et en faisant la somme des valeurs obtenues on aura le temps T nécessaire au transport d'un mètre cube à R relais; ainsi,

$$T = \frac{\frac{10 \times C}{15 \times N} + R \times 0,02 + 0,033}{C}.$$

Supposant $N = 3$, $R = 3$ et $C = 0^{mc},50$, cette formule donne

$T = 0^h,408$. La journée d'un cheval et de son conducteur étant payée 6 fr., et celle de chacun des deux chargeurs 1 fr. 50 cent., ce qui fait une dépense de 9 fr. par jour ou de 90 cent. par heure, le transport du mètre cube de terre à 3 relais revient à $0^f,90 \times 0,408 = 0^f,3672$, prix beaucoup plus élevé qu'avec la brouette et le camion (1° et 2°).

Un travail organisé ainsi que nous venons de le supposer serait vicieux, puisque les deux chargeurs se reposeraient pendant toute la durée du mouvement et de la décharge du tombereau. Pour éviter cela, il faut employer deux tombereaux, dont l'un est en charge pendant que l'autre va à la décharge; de cette manière, le travail journalier du second tombereau, travail égal à celui du premier, ne doit être évalué qu'à 6 fr., ce qui donne pour prix du transport d'un mètre cube de terre à 3 relais $0,60 \times 0,408 = 0^f,2448$; la moyenne du prix d'un mètre cube à 3 relais est donc pour les deux tombereaux

$$\frac{0,3672 + 0,2448}{2} = 0^f,306.$$

Pour que les chargeurs ne perdent pas de temps, il suffit que le nombre R de relais soit tel, que le temps de la charge soit égal au temps employé au mouvement et à la décharge, et que l'on ait par conséquent

$$\frac{10 \times C}{15 \times N} = R \times 0,02 + 0,033;$$

d'où l'on tire, pour le cas où $C = 0^{mc},50$ et $N = 3$, $R = 3,9$ relais. Dans le cas où il n'y a qu'un chargeur avec le conducteur, ce qui fait $N = 2$, cette formule donne $R = 6,7$ relais.

Dans le transport au tombereau, les rampes ne doivent être inclinées qu'au 1/20, et on ne prend tout de même pour l'équivalent d'un relais horizontal de 30 mètres qu'une portion de rampe de 20 mètres de base, et par conséquent de 1 mètre de hauteur (603).

4° *Transport au bourriquet.* Lorsqu'on a à élever des terres verticalement, on peut placer des ouvriers à des étages différents espacés de $1^m,65$, et compter que chaque ouvrier, en 10 heures de travail, peut jeter 15 mètres cubes de terre d'un étage à l'étage supérieur. On peut aussi disposer des rampes s'élevant de $1^m,65$ pour 20 mètres de base, ce qui équivaut à un relais horizontal de 30 mètres; ces deux manières d'opérer font voir que l'on doit adopter la hauteur verticale $1^m,65$ pour relais.

Dans un grand nombre de cas, on est obligé d'élever les terres tout à fait verticalement; on fait alors usage d'un treuil, que l'on nomme bourriquet. L'arbre du treuil a ordinairement $0^m,29$ de diamètre et 1 mètre de longueur, la manivelle a $0^m,40$ de rayon, le diamètre de la corde est de $0^m,03$, la caisse ou panier destiné à recevoir les terres à élever a $0^{mc},033$ de capacité.

Le panier mettant 20 secondes ou $0^h,00556$ pour s'élever de 5 mètres, pour monter d'un relais il emploiera $\frac{0,00556 \times 1,65}{5} = 0^h,00183$ ; comme il descend de 5 mètres en 15 secondes ou $0^h,00417$, la descente d'un relais durera $\frac{0,00417 \times 1,65}{5} = 0^h,00138$. De ces nombres, comme de plus il faut $20'' = 0^h,00556$ pour décrocher un panier plein et en accrocher un vide, et $25'' = 0^h,00695$ pour vider le panier, il résulte que pour élever le contenu $0^{m.cub.},033$ du panier à une hauteur de R relais, il faut un temps représenté par

$$t = R\,(0,00183 + 0,00138) + 0,00556 + 0,00695 \text{ heures.}$$

Si $R = 3$, par exemple, on conclut $t = 0^h,02214$.

Le temps nécessaire pour élever un mètre cube est $T = \frac{t \times 1}{0,033}$, et quand $R = 3$, on a $T = \frac{0,02214 \times 1}{0,033} = 0^h,671$.

Pour manœuvrer une telle machine il faut cinq hommes : un pour remplir le panier, deux pour tourner les manivelles, et deux autres pour décrocher le panier et le vider ; ces quatre derniers alternent leur travail. Supposant que la journée d'un ouvrier soit payée 1 fr. 50 c., ce qui fait $0^f,75$ pour une heure de cinq ouvriers, chaque mètre cube de terre élevé à trois relais coûtera $0,75 \times 0,671 = 0^f,503$.

Trois ouvriers étagés à $1^m,65$ l'un au-dessus de l'autre suffiraient pour élever, à l'aide de la pelle, 15 mètres cubes de terre par jour ; l'élévation de ces 15 mètres cubes coûterait donc 4 fr. 50 c., ce qui ne ferait que $0^f,30$ par mètre cube ; il faut donc, quand cela est possible, substituer ce mode à l'usage du bourriquet.

5° *Transport par chemins de fer.* Au chemin de fer de Saint-Germain, pour les tranchées des Batignolles, les wagons étant remorqués par des chevaux et la distance de transport étant de 1000 à 1500 mètres, le prix du transport de 1 mètre cube à 1000 mètres s'est divisé en :

| | fr. |
|---|---|
| Transport proprement dit. . . . . | 0.20 |
| Réparation et graissage des wagons. . . . . | 0.08 |
| Dépréciation. . . . . | 0.03 |
| Total. . . . . | 0.31 |

La décharge est revenue à $0^f,13$ par mètre cube, y compris les chevaux qui conduisaient les wagons de la gare la plus voisine à la décharge.

La distance de transport ayant été de 3000 mètres, on a fait usage de locomotives, et le prix du transport d'un mètre cube à 1000 mètres s'est divisé en :

| | fr. |
|---|---|
| Transport proprement dit, c'est-à-dire salaire des mécaniciens, combustible et réparations. . . . . | 0.10 |
| Réparation des wagons. . . . . | 0.24 |
| Dépréciation des wagons. . . . . | 0.03 |
| Total. . . . . | 0,37 |

La décharge des wagons est revenue, par mètre cube, à :

| | fr. |
|---|---|
| Chevaux employés à traîner les wagons du point où les déposaient les locomotives jusqu'à la décharge et les ramener. | 0.18 |
| Ouvriers. . . . . | 0.08 |
| Total. . . . . | 0.26 |

Ainsi, sous le point de vue de l'économie, il y aurait avantage à remorquer les wagons par les chevaux; mais les travaux s'exécutent avec moins de rapidité.

Nous allons donner un aperçu de la manière dont se sont divisées les dépenses de la tranchée de Clamart, chemin de fer de Versailles (rive gauche), d'après les séries de prix établies par M. Brabant. Les nombres qui suivent sont extraits du *Portefeuille de l'ingénieur des chemins de fer*, de MM. Perdonnet et Polonceau.

Le cube total des déblais était de 378 000 mètres cubes; mais comme les trois quarts seulement ont été transportés d'un même côté de la tranchée, à une distance supérieure à 1000 mètres, les prix suivants sont établis dans l'hypothèse d'un volume de 300 000 mètres à transporter à une distance de 1000 mètres.

L'accélération des travaux a dû faire sacrifier l'argent pour économiser le temps (les travaux devant être terminés en vingt mois, il a fallu effectuer un transport de 600 mètres cubes par journée de 10 heures de travail).

Les wagons contenaient $1^{mc},50$ de terre et descendaient pleins un chemin incliné à $0^{m},004$ par mètre. Trois chevaux en remorquaient 10 à la vitesse de 25 000 mètres par jour, et une locomotive dont les pistons avaient $0^{m},25$ de diamètre en traînait 20 à la vitesse de 100 000 mètres par jour de 10 heures.

On a compté pour le temps perdu à la charge et à la décharge 10 minutes par voyage, quels que soient le mode de traction et la distance de transport.

Le transport s'effectuant avec des chevaux, il a fallu, pour 600 mètres cubes à transporter par jour, 150 wagons (80 à la charge et décharge, 40 sur la voie, 10 à la réserve et 20 en réparation). Avec les locomotives, il a fallu 132 wagons (80 en charge et décharge, 20 sur la voie, 10 en réserve, 20 en réparation et 2 wagons intermédiaires). Le nombre des locomotives doit être double de celui nécessaire; ainsi, pour une que l'on avait en marche, il en fallait une seconde en réserve ou en réparation.

*Prix du transport d'un mètre cube de déblai à une distance de 1000 mètres, sur un chemin dont la pente est de 0m,004 par mètre, les wagons étant remorqués par des chevaux.*

| | fr. |
|---|---|
| *Intérêt à 5 pour 100 de 375000 fr. qu'a coûté le matériel d'exploitation, et dépréciation de ce matériel.* | 0.4625 |
| *Entretien du matériel.* | 0.2000 |
| Le matériel d'exploitation comprend 150 wagons de terrassement à 650 fr. la pièce, 3000 mètres de doubles voies en fer à 80 fr., 40 changements de voies provisoires à 225 fr. pièce, hangar, bâtiments, outils, 2 échafauds de décharge. | |
| *Pose, démontage et entretien des voies provisoires.* | 0.0873 |
| *Transport des déblais.* | 0.3246 |
| Ce transport exige 8 chevaux, payés 48 fr. par jour, pour conduire les wagons au point où ils doivent être pris par les chevaux chargés du transport; 3 chevaux et 2 conducteurs, payés 24 fr. par jour, par chaque 10 wagons portant 15 mètres cubes de terre à 25000 mètres par jour; 10 minutes de temps perdu (temps pendant lequel les 3 chevaux et les conducteurs ne marchent pas); 12 ouvriers pour pousser et décrocher les wagons, 30 fr. par jour; aiguilleurs, nettoyeurs de rails et graisseurs, 12 ouvriers payés 24 fr. par jour. | |
| *Fouille et charge.* | 0.6000 |
| *Reprises et jets à la pelle ou transports en brouettes nécessaires pour charger en wagons.* | 0.3000 |
| *Déchargement et manœuvre des ponts de décharge, 24 ouvriers à 84 fr. par jour.* | 0.1400 |
| *Dépenses diverses* (manœuvres pour travaux divers, 16 ouvriers à 40 fr. par jour; surveillants et gardiens, 10 employés à 30 fr. par jour). | 0.1467 |
| Total. | 2.2311 |

Pour un supplément de transport à 1000 mètres, l'excès de dépense n'est que de 0f,0402.

Sur un chemin horizontal, au lieu de 3 chevaux pour conduire 10 wagons, il en faudrait 5, ce qui porterait le prix du mètre cube transporté à 1000 mètres à 2f,3085, et l'excès par 1000 mètres de distance en plus, à 0f,0467.

Si le chemin montait de 0m,004 par mètre, il faudrait 8 chevaux et 2 conducteurs payés 54 francs par jour, ce qui porterait les prix précédents à 2f,4243 et 0f,0564.

Quand les wagons sont remorqués par une locomotive, il faut 132 wagons, 2 locomotives du prix de 33000 francs pièce, 12 chevaux pour amener les wagons au point où la locomotive peut les prendre. La locomotive, estimée être de la force de 10 chevaux, produit une dépense journalière évaluée à 101 francs. Ces diverses dépenses font que le prix du transport d'un mètre cube à 1000 mètres est de 2f,3005 sur un chemin descendant de 0m,004 par mètre, 2f,3728 sur un chemin horizontal, et 2f,5137 sur un chemin dont la pente ascendante est de 0m,004 par mètre. Pour ces divers chemins, l'augmentation de dépense pour un excès de 1000 mètres de distance de transport est respectivement 0f,0344, 0f,0391 et 0f,0466.

En effectuant le transport par plans automoteurs, ce qui est nécessaire toutes les fois que les déblais doivent être descendus à une grande profondeur, il faut le même nombre de wagons qu'avec des chevaux, 12 conducteurs de wagons et 15 chevaux, et le prix du transport du mètre cube à une distance de 1000 mètres est de 2f,2861. Ce prix a été établi dans l'hypothèse où le plan automoteur a 200 mètres de longueur et 0m,05 de pente par mètre; cela suffit pour que les wagons acquièrent une impulsion nécessaire pour parcourir ensuite une distance de 800 mètres; ils pourraient même franchir un espace plus long; mais alors il faudrait leur laisser prendre sur le plan une vitesse qui serait dangereuse.

D'après les résultats précédents, et en supposant qu'un tombereau attelé de 2 chevaux serait payé 14 francs par jour de 10 heures, y compris le conducteur; que le temps perdu à la charge et à la décharge serait de 1/40 de jour, que deux chevaux pourraient traîner 0mc,80 ou 1 mètre cube de terre en parcourant 36000 mètres par jour, selon que le chemin serait en terre ou serait une route bien entretenue, MM. Perdonnet et Polonceau ont établi le tableau suivant :

*TABLEAU du prix de revient du transport de 1 mètre cube de déblai à une distance de 1000 mètres sur des chemins horizontaux.*

| DISTANCES de transport. | TRANSPORT AU TOMBEREAU | | TANSPORT EN WAGONS traînés par des | |
|---|---|---|---|---|
| | sur chemins en terre. | sur routes entretenues. | chevaux. | locomotives. |
| m. | fr. | fr. | fr. | fr. |
| 1000 | 2.2195 | 1.7580 | 2.3085 | 2.3728 |
| 1500 | 2.7955 | 2.1470 | 2.5420 | 2.5783 |
| 1600 | 2.9107 | 2.2248 | 2.5887 | 2.6174 |
| 1700 | 3.0259 | 2.3026 | 2.6354 | 2.6565 |
| 1800 | 3.1411 | 2.3804 | 2.6821 | 2.6956 |
| 1900 | 3.2563 | 2.4582 | 2.7288 | 2.7347 |
| 2000 | 3.3715 | 2.5360 | 2.7755 | 2.7738 |
| 3000 | 4.5235 | 3.3140 | 3.2425 | 3.1648 |
| 4000 | 5.6755 | 4.0920 | 3.7095 | 3.5508 |
| 4500 | 6.2515 | 4.4810 | 3.9430 | 3.7513 |
| 4600 | 6 3667 | 4.5588 | 3.9897 | 3.7904 |
| 4700 | 6.4819 | 4.6366 | 4.0364 | 3.8295 |

Ce tableau fait voir que, sous le rapport de l'économie, l'usage des wagons n'est plus avantageux que celui des tombereaux que pour des volumes de déblais considérables et pour des distances de transport supérieures à 1000 mètres; cependant on y a souvent recours pour des distances moindres, parce que les chemins en terre sont impraticables avec

des tombereaux par les temps humides, au lieu qu'avec des wagons et des voies en fer on est rarement obligé d'interrompre les travaux.

Il est à remarquer que l'on peut diminuer notablement les prix du tableau précédent quand les circonstances n'exigent pas, comme dans la vallée de Clamart, une exécution aussi rapide.

Le plus habituellement, pour les grands terrassements, on fait usage de la brouette pour les distances de transport de moins de 100 mètres; du tombereau pour celles de 100 à 500 mètres; des wagons traînés par des chevaux pour celles de 500 à 2000 mètres, et des wagons remorqués par des locomotives pour des distances de 2000 mètres et au-dessus.

On a donné différentes formules pour calculer les prix de revient du transport en wagons traînés par des chevaux, du mètre cube de terrassement et de ballast; celle (1) a été établie par M. Duvignaud, ingénieur en chef des ponts et chaussées, pour les transports exécutés sur la 2e section du chemin de fer d'Orléans à Bordeaux, entre Poitiers et Libourne; elle comprend les mains-d'œuvre supplémentaires pour chargement et déchargement, les faux frais, le bénéfice de l'entrepreneur, la fourniture des wagons et des voies formées de bandes de fer de $0^m,075$ sur $0^m,02$ posées de champ, sans coussinets, sur des petites traverses en bois blanc; elle ne comprend pas les frais de fouille et de charge.

$$x = \frac{L+8}{V} \times 900 + 0{,}25 + 0{,}045\,D \pm DI \qquad (1)$$

$x$ prix du mètre cube en francs;
L longueur cumulée du déblai et du remblai, exprimée en hectomètres;
V volume transporté, en mètres cubes;
D distance du centre de gravité du déblai à celui du remblai, en hectomètres,
I déclivité.

Pour les ateliers où les voies servent pour la seconde fois, on a

$$x = \frac{L+8}{V} \times 250 + 0{,}25 + 0{,}045\,D \pm DI$$

La formule (2) a été appliquée au chemin de fer du Nord:

$$x = \frac{15\,D + 2000}{V} \times 0{,}00\,031\,D + 0{,}40 \qquad (2).$$

D distance moyenne du transport, en mètres.

Cette formule suppose :

1° Que la longueur des voies provisoires avec rails définitifs est égale à 3D;
2° Que la longueur des voies provisoires établies sans rails définitifs est de 300 mètres;
3° Que le développement total des voies posées, déplacées ou enlevées pour l'exécution des travaux est égale à 6D.

La formule (3) a été établie par M. Brabant, en 1847, dans le but de calculer approximativement les frais de transport en wagons pour la tranchée à ouvrir sur la ligne de Lille à Dunkerque.

$$x = \frac{D+20}{V} \times 0{,}50 + 0{,}40 + 0{,}04\,D \qquad (3).$$

D distance moyenne de transport en hectomètres ;
V volume à transporter en milliers de mètres.

Cette valeur de $x$ comprend la fourniture et l'entretien du matériel, wagons et voies provisoires formées avec un matériel provisoire (*) ; les frais de pose, dépose, repose et entretien des voies, les mains-d'œuvre supplémentaires pour chargement et déchargement, et généralement toutes les dépenses, sauf celles de fouille et charge.

(*) Pour des cubes d'une certaine importance, la formule précédente peut encore s'appliquer au cas où les voies provisoires sont formées avec un matériel définitif.

A. *Tableau dressé par M. Brabant, d'après les formules précédentes, et donnant le prix du transport d'un mètre cube de déblais ou de ballast, avec wagons de terrassement ordinaires traînés par des chevaux sur voies provisoires*, en supposant la voie horizontale.

| FORMULES. | DISTANCE de transport. | Prix du mètre cube pour un volume de | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 25 000 | 50 000 | 75 000 | 100 000 | 150 000 | 200 000 | 300 000 |
| | | fr. | fr. | fr. | fr. | fr. | fr. | fr. |
| (1) | 500 | 1.231 | 0.853 | 0.727 | 0.664 | 0.601 | 0.570 | 0.538 |
| | 1000 | 1.636 | 1.168 | 1.012 | 0.934 | 0.856 | 0.817 | 0.778 |
| | 1500 | 2.041 | 1.483 | 1.297 | 1.204 | 1.111 | 1.065 | 1.018 |
| | 2000 | 2.446 | 1.798 | 1.582 | 1.474 | 1.366 | 1 312 | 1.258 |
| | 2500 | 2.851 | 2.113 | 1.867 | 1.744 | 1.621 | 1.560 | 1.498 |
| | 3000 | 3.256 | 2.428 | 2.152 | 2.014 | 1.876 | 1.807 | 1.738 |
| (2) | 500 | 0.935 | 0.745 | 0.682 | 0.650 | 0.618 | 0.603 | 0.587 |
| | 1000 | 1.390 | 1.050 | 0.937 | 0.880 | 0.823 | 0.795 | 0.767 |
| | 1500 | 1.845 | 1.355 | 1.192 | 1.110 | 1.028 | 0.988 | 0.947 |
| | 2000 | 2.300 | 1.660 | 1.447 | 1.340 | 1.233 | 1.180 | 1.127 |
| | 2500 | 2.755 | 1.965 | 1.702 | 1.570 | 1.438 | 1.373 | 1.307 |
| | 3000 | 3.210 | 2.270 | 1.957 | 1.800 | 1.643 | 1.565 | 1.487 |
| (3) | 500 | 1.100 | 0.850 | 0.767 | 0.725 | 0.683 | 0.663 | 0.642 |
| | 1000 | 1.400 | 1.100 | 1.000 | 0 950 | 0.900 | 0.875 | 0.850 |
| | 1500 | 1.700 | 1 350 | 1.233 | 1.175 | 1.116 | 1 088 | 1.058 |
| | 2000 | 2.000 | 1 600 | 1.467 | 1.400 | 1.333 | 1.300 | 1.267 |
| | 2500 | 2.300 | 1.850 | 1.700 | 1.625 | 1.550 | 1.513 | 1.475 |
| | 3000 | 2.600 | 2.100 | 1.933 | 1.850 | 1.766 | 1.725 | 1.683 |

B. *M. Brabant a également dressé le tableau comparatif suivant, des prix moyens du transport sur voies horizontales d'un mètre cube de terre ou de ballast du poids moyen de* 1600 *kil.*

| DISTANCE DE TRANSPORT. | MODE DE TRANSPORT. | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | A la brouette. | Au camion traîné par des hommes. | A dos de mule. | Au tombereau traîné par des chevaux. | VOLUME de 100.000 mètres transportés sur voies provisoires avec wagons ordinaires de terrassement. | | VOLUME de 20.000 mètres transportés sur voies définitives avec locomotives à la vitesse de 25 kilom. à l'heure. | | | SUR COURS D'EAU(2). | |
| | | | | | Chevaux au pas. | Locomotive à la vitesse de 12 kilom. à l'heure. | Tous frais compris(1). | Non compris la dépense des voies. | Dépense des véhicules seulement. | Grand bateau de 30 mètres cubes à un cheval. | Petit bateau de 2 mètres cubes à un homme. |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Formules. | 0.450 D | 0.10 + 0.25 D | 0.20 + 0.25 D | 0.30 + 0.12 D | 0.50 + 0.045 D | 0.56 + 0.036 D | 0.45 + 0.01 D | 0.45 + 0.005 D | 0.20 + 0.005 D | 0.24 + 0.004 D | 0.08 + 0.008 D |
| 10 | 0.045 | » | » | » | » | » | » | » | » | » | » |
| 20 | 0.090 | » | » | » | » | » | » | » | » | » | » |
| 30 | 0.135 | » | » | » | » | » | » | » | » | » | » |
| 40 | 0.180 | » | » | » | » | » | » | » | » | » | » |
| 50 | 0.225 | 0.225 | 0.325 | » | » | » | » | » | » | » | » |
| 60 | 0.270 | 0.250 | 0.350 | » | » | » | » | » | » | » | » |
| 70 | 0.315 | 0.275 | 0.375 | » | » | » | » | » | » | » | » |
| 80 | 0.360 | 0.300 | 0.400 | » | » | » | » | » | » | » | » |
| 90 | 0.405 | 0.325 | 0.425 | » | » | » | » | » | » | » | » |
| 100 | 0.450 | 0.350 | 0.450 | 0.420 | 0.545 | 0 596 | 0.460 | 0.455 | 0.205 | 0.244 | 0.088 |
| 120 | 0.540 | 0.400 | 0.500 | 0.444 | 0.554 | 0.603 | 0.462 | 0.456 | 0.206 | 0.245 | 0.090 |
| 140 | 0.630 | 0.450 | 0.550 | 0.468 | 0.563 | 0.610 | 0.464 | 0.457 | 0.207 | 0.246 | 0.091 |
| 160 | 0.720 | 0.500 | 0.600 | 0.492 | 0.572 | 0.618 | 0.466 | 6.458 | 0.208 | 0.246 | 0.093 |
| 180 | 0.810 | 0.550 | 0.650 | 0.516 | 0.581 | 0.624 | 0.468 | 0.459 | 0.209 | 0.247 | 0.094 |
| 200 | 0.900 | 0.600 | 0.700 | 0.540 | 0.590 | 0.632 | 0 470 | 0.460 | 0.210 | 0.248 | 0.096 |
| 300 | » | 0.850 | 0.950 | 0.660 | 0.635 | 0.668 | 0.480 | 0.465 | 0.215 | 0.252 | 0.104 |
| 400 | » | 1.100 | 1.200 | 0.780 | 0.680 | 0.704 | 0.490 | 0.470 | 0.220 | 0.256 | 0.112 |
| 500 | » | 1.350 | 1.450 | 0.900 | 0.725 | 0.740 | 0.500 | 0.475 | 0.225 | 0.260 | 0.120 |
| 600 | » | 1.600 | 1.700 | 1.020 | 0.770 | 0.776 | 0.510 | 0.480 | 0.230 | 0.264 | 0.128 |
| 700 | » | 1.850 | 1.950 | 1.140 | 0.815 | 0.812 | 0.520 | 0 485 | 0.235 | 0.268 | 0.136 |
| 800 | » | 2.100 | 2.200 | 1.260 | 0.860 | 0.848 | 0.530 | 0.490 | 0.240 | 0.272 | 0.144 |
| 900 | » | 2.350 | 2.450 | 1.380 | 0 905 | 0.884 | 0.540 | 0.495 | 0.245 | 0 276 | 0.152 |
| 1000 | » | 2.600 | 2.700 | 1 500 | 0.950 | 0.920 | 0.550 | 0 500 | 0.250 | 0.280 | 0.160 |
| 1100 | » | » | » | 1.620 | 0.995 | 0.956 | 0.560 | 0.505 | 0.255 | 0.284 | 0.168 |
| 1200 | » | » | » | 1.740 | 1.040 | 0.982 | 0.570 | 0 510 | 0.260 | 0.288 | 0.176 |
| 1300 | » | » | » | 1.860 | 1.085 | 1.028 | 0.580 | 0.515 | 0.265 | 0.292 | 0.184 |
| 1400 | » | » | » | 1.980 | 1.130 | 1.064 | 0.590 | 0.520 | 0.270 | 0.296 | 0.192 |
| 1500 | » | » | » | 2.100 | 1.175 | 1.100 | 0.600 | 0.525 | 0.275 | 0.300 | 0.200 |
| 1600 | » | » | » | 2.220 | 1.220 | 1.130 | 0.610 | 0 530 | 0.280 | 0.304 | 0.208 |
| 1700 | » | » | » | 2.340 | 1.265 | 1.172 | 0.620 | 0.535 | 0.285 | 0.308 | 0.216 |
| 1800 | » | » | » | 2.460 | 1.310 | 1.208 | 0.630 | 0.540 | 0.290 | 0.312 | 0.224 |
| 1900 | » | » | » | 2.580 | 1.350 | 1.244 | 0.640 | 0.545 | 0.295 | 0.316 | 0.232 |
| 2000 | » | » | » | 2.700 | 1.400 | 1.280 | 0.650 | 0.550 | 0.300 | 0.320 | 0.240 |
| 2500 | » | » | » | » | 1.625 | 1.460 | 0.700 | 0.575 | 0.325 | 0.340 | 0.280 |
| 3000 | » | » | » | » | 1.850 | 1.640 | 0.750 | 0.600 | 0.350 | 0.360 | 0.320 |
| 4000 | » | » | » | » | » | 2.000 | 0.850 | 0.650 | 0.400 | 0.400 | 0.400 |
| 5000 | » | » | » | » | » | 2.360 | 0.950 | 0.700 | 0.450 | 0.440 | 0.480 |
| 10000 | » | » | » | » | » | 4.160 | 1.450 | 0.950 | 0.700 | 0.640 | 0.880 |
| 15000 | » | » | » | » | » | 5.960 | 1.950 | 1.200 | 0.950 | 0.840 | 1.280 |
| 20000 | » | » | » | » | » | » | 2.450 | 1.450 | 1.200 | 1.040 | 1.680 |
| 25000 | » | » | » | » | » | » | 2.950 | 1.700 | 1.450 | 1.240 | 2.080 |
| 50000 | » | » | » | » | » | » | 5.450 | 2.950 | 2.700 | 2.240 | 4.080 |

(1) Voies de fer, wagons, remaniement des déblais, déchargement, etc.
(2) Non compris les frais de chargement et de déchargement, et ceux de transport du lieu d'extraction au bateau et du bateau au lieu d'emploi.

Remarques sur le tableau précédent :

1re. Les wagons sont supposés porter 2 mètres cubes ; un tombereau attelé de deux chevaux est du prix de 12 fr. par jour, il porte $0^{mc},666$, parcourt 30000 mètres, et le temps perdu à la charge et à la décharge est de 15 minutes.

2e. Il est évident que l'on ne peut établir de comparaison qu'entre les prix des 7 premières colonnes du tableau.

3e. Dans le cas où le poids du mètre cube ne serait pas 1600 kilog., à l'exception des prix des colonnes 5 et 6, tous les autres varieraient proportionnellement au poids ; quant à ceux de ces colonnes qui dépendent d'éléments très-importants qui ne varient pas comme les poids à transporter, on s'éloignerait peu de la vérité en adoptant moitié de la variation proportionnelle au poids.

4e. Sur les rampes, aux distances mesurées horizontalement, on ajoutera 10 fois la distance verticale du centre de gravité du déblai à celui du remblai, lorsqu'il s'agira de transporter à la brouette, au camion, à dos de mule et au tombereau ; 40 fois cette distance verticale pour le transport en wagons, et 1000 fois pour le transport en bateaux quand il n'y a pas d'écluses ; dans le cas contraire, on compte de 10 à 15 minutes de temps perdu par écluse, suivant la hauteur de chute.

Pour les pentes, on retranche des distances horizontales moitié des quantités qu'on ajoute pour les rampes. Dans la pratique, on tient rarement compte de ces réductions.

5e. Les éléments concernant les prix des colonnes 5, 6 et 7 sont :

Matériel des ateliers des voies en fer et des wagons, moins-value, entretien, pose, dépose, repose, etc. ;

Transport proprement dit, frais de traction, graissage des wagons, formation des convois, manœuvre des aiguilles et nettoyage des voies ;

Déblais, remaniement à la charge, ouverture de la cunette et déchargement.

6e. Si l'on voulait établir une comparaison entre les prix des tableaux précédents et ceux de la page 830, il faudrait d'abord retrancher de ces derniers la fouille et la charge, comprises pour $0^f,60$, prix payé à la tranchée de Clamart, ouverte dans une marne très-compacte, mêlée de terre et de cailloux d'une extraction difficile.

La grande différence que l'on aurait encore doit être attribuée aux perfectionnements apportés dans les travaux depuis 1838 ; à ce que les chiffres du tableau B sont des moyennes, au lieu qu'à Clamart la main-d'œuvre est d'un prix très-élevé ; enfin, à ce que les déblais de Clamart étaient d'un poids énorme, et qu'ils foisonnaient de 50 p. 100 ; de plus encore, les travaux ont été poussés avec une rapidité exceptionnelle.

606. *Construction des chaussées.* Tous les déblais et remblais étant effectués, on procède à la construction de la chaussée, ou partie solide de la route. On commence par creuser la forme qu'elle doit occuper, en jetant à la pelle les terres de part et d'autre sur chacun des accotements, comme l'indique la figure 24, planche III. Il est évident que si la route était en remblai, on ménagerait à l'avance cette forme, dont le fond est à peu près incliné comme la surface de la chaussée (592).

607. *La chaussée étant pavée*, on calcule la profondeur de l'encaissement d'après la hauteur des pavés et l'épaisseur de $0^m,10$ à $0^m,15$ que l'on donne à la couche de sable, sur laquelle on les pose, quelles que soient leur nature et leur forme, afin de répartir la charge que chaque pavé peut avoir à supporter sur une surface plus grande que sa base.

Les pierres que l'on emploie plus particulièrement comme pavés sont le grès, le granit, le basalte, le porphyre, le schiste, le calcaire et les cailloux roulés (520) ; à l'exception de ces derniers, que l'on emploie

tels qu'on les trouve, pourvu qu'ils aient des dimensions convenables, les pavés faits avec les autres pierres se débitent en cubes dont les dimensions varient de $0^m,16$ à $0^m,25$.

Dans les rues, le pavé s'étend dans toute la largeur qui sépare les maisons ou les trottoirs qui les longent; mais pour les routes, il ne se fait que sur la chaussée, ce qui oblige de le terminer de chaque côté par un rang de pavés plus forts, lesquels, par leur grand empatement, quoique très-faiblement maintenus du côté de l'accotement, ne sont pas renversés par les voitures qui passent de la chaussée sur les accotements.

Aux environs de Paris, les pavés ordinaires ont $0^m,22$ de côté, tandis que ceux des bordures ont $0^m,22 \times 2 = 0^m,44$ de longueur, $0^m,22 \times 1,5 = 0^m,33$ de largeur, et une épaisseur ordinairement un peu moindre que $0^m,33$. Aujourd'hui la largeur se réduit à $0^m,22$, afin que les bordures se relient bien avec les pavés.

Sur la couche de sable de $0^m,13$ environ d'épaisseur étalée sur le fond de l'encaissement qui doit recevoir la chaussée, on place les pavés par rangs perpendiculaires à l'axe de la route, en ayant soin que les joints longitudinaux d'un rang correspondent, autant que possible, au milieu des pavés des rangs voisins. On a la précaution de réunir les pavés de même grandeur et de même dureté.

Avec des pavés cubiques de $0^m,22$ à $0^m,23$ de côté, la quantité de sable employée par mètre carré de chaussée est de $0^{mc},13$ pour la forme, $0^{mc},03$ pour les joints, et $0^{mc},02$ pour couvrir le pavage, afin d'achever de remplir les joints, ce qui fait en tout $0^{mc},18$.

Quand, au lieu d'employer des pavés neufs, on fait usage de pavés déjà usés, à la couche de $0^m.13$ de sable on ajoute une épaisseur convenable pour tenir toujours la surface de la chaussée à la même hauteur.

Il ne faut pas que les pavés se touchent; aussi, à cause du bombement assez fréquent de leurs faces, les joints ont-ils de $0^m,020$ à $0^m,025$ d'épaisseur; on prescrit ordinairement de ne leur donner que de $0^m,007$ à $0^m,008$; mais pour atteindre ce but, on serait obligé de les tailler, ce qui est coûteux et ne peut se faire que dans des cas particuliers.

Lorsque deux rues très-fréquentées se croisent, pour que les roues des voitures ne suivent pas les joints des rangs parallèles de pavés, on place ces rangs parallèlement à l'axe du carrefour.

Avant de livrer une rue à la circulation, on affermit chaque pavé dans son alvéole et on l'amène au niveau convenable en le frappant avec une *hie* du poids de 25 à 45 kilog.; c'est seulement après cette opération que l'on recouvre le pavage de la dernière couche de sable de $0^m$ 02 d'épaisseur.

Dans les rues où il y a un ruisseau au milieu de la chaussée, si l'on plaçait un joint dans l'axe du ruisseau, il serait promptement creusé par les roues des voitures qui tendent naturellement à le suivre. Pour

remédier à cet inconvénient, on a imaginé de poser chacun des pavés qui forment le ruisseau de manière qu'un tiers de sa largeur se trouve d'un côté de l'axe du ruisseau et les deux autres tiers de l'autre. Cette disposition, qui réussit à la campagne, ne convient pas dans les villes, où les petits barrages successifs que forment les pavés retiennent les eaux ménagères, lesquelles, en se corrompant, répandent une mauvaise odeur. Il convient, dans ce cas, de former le ruisseau avec des pavés d'une longueur égale à une fois et demie celle d'un pavé ordinaire, dont la face supérieure est taillée concave et de manière que l'axe se trouve au tiers de sa longueur.

Dans les localités où l'on fait usage de cailloux roulés pour le pavage des rues, on les dispose comme les pavés cubiques, en plaçant le gros bout en bas, afin qu'ils ne s'enfoncent pas sous les charges qu'ils ont à supporter. Afin d'obtenir un pavé plus uni, on place quelquefois le gros bout en haut, mais en inclinant les pavés ; malgré cette inclinaison, le pavage est moins solide que par la première disposition.

Les vides étant beaucoup plus grands entre les cailloux roulés qu'entre les pavés cubiques, leur mise en œuvre absorbe un plus grand volume de sable que celle de ces derniers.

On juge de la qualité des pavés :

1° Par la densité ; celle des pavés en grès des environs de Paris est de 2,540, au lieu que celle des grès tendres de Fontainebleau n'est que de 2,390 ;
2° Par la quantité d'eau qu'ils absorbent quand ils sont immergés ; les plus durs absorbent 1/569 d'eau, et les plus tendres 1/51 ;
3° Par le son qu'ils rendent sous le choc du marteau ; ce son est d'autant plus sourd qu'ils sont plus tendres ou plus fendillés.

**608.** *Pour les chaussées en empierrement.* Si le sol est peu résistant, on commence par placer sur tout le fond de l'encaissement de la chaussée une assise de pierres plates, pour servir de fondation et empêcher les petites pierres de pénétrer dans le sol. Sur ces pierres plates, on repose les bases de pierres autant que possible coniques et de $0^m,15$ à $0^m,20$ de hauteur, et sur ces dernières on place les pierres concassées, qu'il est bon de répandre par couches que l'on comprime au fur et à mesure avec une hie ou un rouleau en fonte, afin qu'elles s'enchevêtrent bien les unes dans les autres et dans les aspérités des pierres coniques. On peut encore comprimer les couches successives de pierres en faisant passer dessus les voitures de roulage. Il faut avoir soin de refermer les ornières au fur et à mesure qu'elles se forment.

Quand le sol est déjà résistant par lui-même, on se dispense de l'assise de pierres plates ; on repose directement sur le sol les bases des pierres coniques, que l'on choisit avec le plus d'empatement possible, et dessus on place les pierres concassées comme dans le premier cas. Au lieu de pierres on emploie quelquefois une couche de sable pour consolider le sol.

Ces chaussées sont maintenues latéralement par deux rangs de bordures en fortes pierres prismatiques, que l'on place de manière que leurs arêtes latérales soient parallèles à l'axe de la route; il convient que ces prismes soient triangulaires, afin que, reposant par une face latérale, ils présentent en haut une arête, laquelle ne produit pas l'effet d'une enclume pour briser les petites pierres sous les roues des voitures, comme le ferait une surface plane; cette dernière circonstance oblige de faire reposer les bordures par une arête, lorsque leur forme est un prisme à base carrée. Ces bordures se maintiennent du côté des accotements par un bourrelet en pierres dont la grosseur diminue depuis le bas jusqu'en haut.

Quand le sol est solide et non sujet à se délayer, toute la chaussée n'est composée que de petites pierres semblables à celles employées pour former la dernière couche dans les cas précédents. Ce mode de construction est souvent employé. C'est surtout dans ce cas qu'il faut avoir soin de comprimer la chaussée avant de la livrer à la circulation; à cet effet on fait usage de rouleaux compresseurs, dont on fait varier à volonté le poids depuis 3000 jusqu'à 9000 kilog., et qui sont quelquefois traînés par 10 ou 12 chevaux.

L'épaisseur des chaussées construites uniquement en petits matériaux varie de $0^m,15$ à $0^m,30$, suivant la nature du sol et le poids des voitures; celle des chaussées à un rang de pierres coniques varie de $0^m,30$ à $0^m,35$, et celle à deux assises de grosses pierres, de $0^m,40$ à $0^m,45$.

Les meilleures pierres employées à la construction des chaussées sont celles qui résistent à la gelée, qui sont anguleuses, afin qu'elles se relient facilement, et qui sont dures, mais non au point de ne pouvoir former les détritus nécessaires à leur liaison; celles qui remplissent le mieux toutes ces conditions sont le muschelkalk, le calcaire dur, le silex anguleux non fragile.

Les petites pierres doivent pouvoir passer dans tous les sens dans un anneau de $0^m,06$ de diamètre. Elles doivent être purgées de terre; car celle-ci, par les temps de pluie et surtout de gelée et de dégel, se gonfle et désunit les matériaux qui composent la chaussée.

Les pierres concassées fournissent facilement les détritus nécessaires à leur liaison; mais lorsqu'on fait usage de gros gravier, qui ne forme que très-difficilement des détritus, on est obligé d'y mélanger une certaine quantité de sable, ou de briser à l'avance les plus gros galets.

Le volume des vides est les 0,38 du volume total pour le gravier et les 0,47 pour les pierres concassées; aussi, après le tassement complet, un mètre cube est-il réduit ordinairement à $0^{mc},71$. Quelques ingénieurs ont imaginé de remplir les vides au moment de la construction à l'aide de petit gravier et même de détritus.

**609.** *Chaussée sur un sol compressible ou mouvant.* Lorsqu'une route

traverse un sol tourbeux ou vaseux d'une certaine profondeur, il convient de la reposer sur deux assises de fascines se croisant à angle droit, et s'étendant de part et d'autre des remblais, que l'on a soin de choisir les plus légers possibles.

Ces fascines, tout en diminuant les chances d'enfoncement de la route et les affaissements partiels, ont encore l'avantage de la maintenir plus sèche.

Une route construite sur un sol glaiseux est sujette à des changements de forme par suite de son glissement sur la glaise humide. On évite cet inconvénient en construisant des *pierrés*, petits canaux formés de deux petites murettes en pierres sèches, que l'on recouvre d'une large pierre plate. Ces canaux, auxquels on donne de $0^m,10$ à $0^m,20$ de largeur, partent de la forme de la chaussée et viennent aboutir aux fossés en passant sous les accotements. Si la route est en pente, les pierrés partent de la forme et vont aboutir aux fossés par la ligne de plus grande pente. Si la route est horizontale, on dispose longitudinalement la forme en pente et contre-pente, et à chaque point bas on établit un pierré normal à l'axe de la route. Ces pierrés, en maintenant la route sèche, ont l'avantage d'empêcher la glaise de se détremper et par suite de se prêter au glissement (422).

**610.** *Cassis.* Lorsqu'une route traverse un vallon à fleur du sol, et que ce vallon ne fournit des eaux qu'accidentellement, on fait passer les eaux sur la route, mais en ayant soin de la paver de part et d'autre de la ligne basse, jusqu'au-dessus du niveau que peuvent atteindre les eaux: par cette disposition, les eaux ne peuvent pas attaquer la route. Il faut que ce ruisseau transversal, que l'on appelle *cassis*, ait, sur la route, une pente assez grande pour que les eaux n'y laissent pas déposer le limon qu'elles entraînent.

**611.** *Écharpes.* Nous avons déjà dit qu'afin d'éviter que les eaux pluviales ne suivent les frayés des roues, on donnait à la route une pente transversale; mais cela ne suffit pas dans le cas où la route a une forte pente longitudinale et qu'elle est sujette à être souvent mouillée. Dans ce cas, on force l'eau à s'écouler latéralement en établissant des bourrelets en petits matériaux sur la surface de la route. Ces petites digues, que l'on appelle *écharpes*, ont transversalement une pente très-douce du côté d'aval, afin de ne pas former des obstacles trop difficiles à franchir par les voitures; du côté d'amont, on leur donne une pente d'environ $0^m,05$ en sens contraire de celle de la route.

Longitudinalement, les écharpes partent de l'axe de la route, et elles sont dirigées suivant la ligne de plus grande pente de la surface de la route. Pour déterminer cette ligne de plus grande pente, on prend sur l'axe de la route le point A, duquel doit partir l'écharpe; on trace une ligne AB dirigée suivant l'axe de la route et une autre AC normale à AB; sur ces lignes on prend deux points qui soient de niveau, c'est-à-dire

à une même distance verticale au-dessous du point A ; on joint ces deux points par une ligne, qui est horizontale et placée sur la surface de la route ; on abaisse du point A une perpendiculaire à cette horizontale, et cette perpendiculaire est la ligne de plus grande pente.

Si la route est bombée, l'écharpe a la forme d'un chevron, et si elle n'a qu'une pente transversale, l'écharpe est tout entière placée dans la même direction, et elle est alors véritablement une écharpe.

**612.** *Fossés en gradins.* Lorsque les fossés sont construits dans un sol affouillable et qu'ils ont une forte pente, afin de diminuer la vitesse des eaux, on dispose les fossés en gradins, en construisant en pierres sèches des murs de chute pour retenir les terres, et des enrochements au pied de ces murs pour éviter les affouillements.

**613.** *Entretien des routes pavées.* Cet entretien se fait par *relevés à bout* et par *entretien simple.*

1° *Un relevé à bout* consiste à enlever tous les pavés, pour découvrir complétement une certaine étendue de la forme ; à piocher cette forme pour lui rendre son élasticité ; à enlever le sable qui est devenu terreux ; à rapporter du nouveau sable pour compenser celui rejeté ainsi que l'usure des pavés, afin de replacer la surface du pavage au niveau primitif, et à reconstruire la chaussée comme si elle était neuve, en ayant soin de mettre au rebut tous les pavés de mauvaise qualité, et ceux auxquels l'usure a donné des formes défectueuses ou des dimensions trop faibles.

A Paris, tous les pavés ayant moins de $0^m,16$ d'épaisseur sont rebutés, et ordinairement ce rebut s'élève à 1/8.

A l'origine du relevé à bout on pose deux rangs de pavés neufs, afin de marquer le point où commence le travail ; puis on place tous les pavés vieux, en ayant soin de réunir, autant que possible, ceux de mêmes dimensions et de même dureté ; on termine ensuite le travail par des pavés neufs. Si le relevé à bout avait une certaine étendue, afin d'éviter le transport des pavés vieux, de distance en distance on placerait quelques rangs de pavés neufs.

A Paris, avec des pavés neufs, un mètre carré de relevé à bout exige $0^{mc},02$ de sable pour rafraîchir la forme, $0^{mc},03$ pour les joints, et $0^{mc},02$ pour couvrir l'ouvrage, ce qui fait en tout $0^{mc},07$ ; avec les pavés vieux, outre ces $0^{mc},07$ de sable, il en faut $0^{mc},03$ pour compenser l'usure des pavés.

A Paris, les rues très-fréquentées sont relevées à bout à peu près tous les six ans ; quelques-unes, établies en mauvais pavés ou sur un sol argileux, le sont tous les trois ans ; on relève les moins passagères tous les vingt ans. Les routes des environs de Paris sont relevées à bout tous les huit à quinze ans.

2° *L'entretien simple* consiste à remplacer seulement çà et là quelques pavés cassés, ou à relever les parties de pavage enfoncées ou usées.

Ce travail exige, avant de replacer les pavés, que l'on fasse subir à la forme les mêmes opérations que pour un relevé à bout. La quantité de sable employé est ordinairement de $0^{mc},08$ par mètre carré de surface des pavés remplacés ou remaniés.

**614.** *Entretien des chaussées en empierrement. Cantonniers.* La nature des matériaux employés dans ce genre de chaussées exige un entretien de tous les instants. Aussi des ouvriers sont-ils constamment occupés à empêcher l'eau de séjourner sur la chaussée, à enlever la boue et la poussière à mesure qu'elles se forment, et à prévenir les flaches et les ornières. C'est surtout dans les moments de pluie ou de dégel que ces soins sont indispensables à la conservation de la route.

Les ouvriers occupés à l'entretien des routes sont appelés *cantonniers*, chacun d'eux est seul chargé des travaux d'une certaine étendue de route, que l'on appelle *canton*. Quand, dans les mauvais temps, ils ne suffisent pas pour tous les travaux, on leur adjoint des ouvriers appelés *auxiliaires*.

Tous les trois cantonniers, il y en a un, appelé *cantonnier chef*, chargé de surveiller ses deux voisins et de les conseiller dans leurs travaux. Le temps perdu à cette surveillance exige que son canton soit moins étendu que ceux de ses voisins.

Tous ces cantonniers, chefs et ordinaires, sont surveillés par les piqueurs, les conducteurs et les ingénieurs, à des époques non fixées à l'avance, afin que la surveillance soit comme de tous les instants. Des petites lunettes permettent aux surveillants de voir depuis une grande distance, et par conséquent sans être aperçus, si les cantonniers font leur devoir. Les peines infligées aux cantonniers pris en contravention consistent en retenues sur le salaire.

Les cantonniers doivent choisir les temps humides pour rapporter les matériaux sur la route, parce qu'alors ils peuvent enlever facilement la boue, et de plus la surface de la route étant un peu ramollie, sa liaison avec les pierrailles rapportées est plus facile.

Il faut éviter que la boue et la poussière séjournent sur la route, et avoir soin de les enlever avant de replacer des matériaux, surtout si la route repose sur un sol crayeux ou glaiseux, parce que ces détritus pénétrant dans la chaussée, l'eau qui s'y infiltre désunit en se congelant toutes les parties de la chaussée.

Dans le Jura, où l'on emploie des pierres calcaires d'une qualité médiocre, M. Monnet, ingénieur des ponts et chaussées (*Annales*, 1857), a reconnu que les bonnes chaussées renferment de $0^{mc},35$ à $0^{mc},45$ de détritus pour un mètre cube de pierre; qu'elles deviennent médiocres quand la proportion de détritus atteint $0^{m},50$, et mauvaises quand elle atteint $0^{mc},75$.

Pour relever une flache quelconque, M. Monnet fait piquer dans toute son étendue une forme de $0^{m},06$ à $0^{m},07$ de profondeur uniforme

et à bords verticaux; puis, après avoir fait balayer avec soin les détritus, et répandre au besoin un peu d'eau, on procède au remplissage avec les pierres que l'on a préalablement mélangées avec des détritus mouillés, de manière à en faire une espèce de béton composé de quatre parties de pierres pour une de boue de route. Ce béton est tassé avec le plus grand soin au moyen d'un pilon en bois de $0^m,25$ à $0^m,30$ de diamètre à la base et du poids de 12 à 15 kilog. On termine le damage après avoir répandu des pierres plus petites non mélangées de détritus. Jusqu'à ce que la prise soit complète, on a soin de maintenir la surface unie et polie, en effaçant, à l'aide du pilon, les arrachements faits par les pieds des chevaux ou les traces laissées par les roues des voitures.

Aux termes du règlement auquel sont soumis les cantonniers, ils doivent se pourvoir à leurs frais :

1° D'une brouette;
2° D'une pelle en fer;
3° *Id.* en bois;
4° D'une *houe* ou *tournée*, outil formant pioche d'un côté et pic de l'autre;
5° D'un racloir en fer;
6° *Id.* en bois;
7° D'un râteau en fer;
8° D'une pince en fer;
9° D'une masse en fer pour casser les pierres ou cailloux;
10° D'un cordeau de 20 mètres.

Les chefs cantonniers doivent être munis, en outre :

1° De trois nivelettes ou voyants;
2° D'un niveau à perpendiculaire gradué, pour indiquer les pentes;
3° D'un double mètre.

L'administration fournit elle-même les balais nécessaires à l'enlèvement des détritus, et elle confie de plus à chacun :

1° Un anneau en fer de 6 centimètres de diamètre, pour faire et vérifier le cassage des matériaux d'entretien;
2° La plaque de cuivre portant en découpure le mot *cantonnier;*
3° Le brassard que les chefs cantonniers portent au bras gauche;
4° Le livret renfermé dans un étui en fer-blanc;
5° Enfin, un jalon de 2 mètres de longueur, divisé en décimètres, ferré par le bas, et garni par le haut d'une plaque en forte tôle, sur chacune des faces de laquelle est indiqué en chiffres très-apparents le numéro du canton. Ce jalon doit toujours être planté sur la route, à moins de 100 mètres de distance de l'endroit où travaille le cantonnier.

## PONTS.

**615.** *Diverses espèces de ponts.* On appelle pont un ouvrage d'art destiné à réunir les deux portions d'une voie de communication interrompue par un cours d'eau, un ravin, ou même par une autre voie située à un niveau inférieur à celui de la première.

Lorsqu'un pont n'est supporté que par deux points d'appui espacés de 4 à 5 mètres au plus, il prend le nom de *ponceau*.

Un pont destiné à faire passer une voie au-dessus d'une autre, ou même d'un vallon dans lequel on ne veut pas la faire descendre, prend le nom de *viaduc*. Cependant ce nom est plus particulièrement réservé aux grands travaux composés d'arches nombreuses et élevées, à l'aide desquels les chemins de fer franchissent les vallées profondes.

Les *ponts-aqueducs* sont ceux qui font passer un cours d'eau au-dessus d'un chemin ou d'une rivière.

Les *ponts-canaux* sont ceux qui supportent un canal de navigation.

Les ponts se divisent encore en *ponts fixes*, ce sont ceux construits à demeure et offrant un passage continu ; en *ponts mobiles*, comprenant ceux qui, en restant dans un point déterminé, permettent d'interrompre momentanément le passage; en *ponts volants* ou ponts que l'on peut déplacer à volonté.

Les ponts se construisent en pierre, en bois ou en métal.

Les points d'appui extrêmes d'un pont sont appelés *culées ;* ceux intermédiaires prennent le nom de *piles* quand ils sont en pierre, et de *palées* quand ils sont en bois. Ce qui sépare deux points d'appui prend le nom de travée si l'on y a fait usage du bois, et celui d'*arche* si l'on a employé la pierre. Les petites arches prennent le nom d'*arceaux*.

### PONCEAUX.

**616.** *Ponceaux.* On les construit ordinairement sur des ruisseaux dont le volume d'eau est très-variable suivant les saisons, et quelquefois même sur des ravins à sec une partie de l'année.

Lorsqu'on a un ponceau à construire, la première chose à déterminer est le *débouché*, c'est-à-dire la distance entre les culées.

Ce débouché doit être suffisant pour débiter les plus grands volumes d'eau qui peuvent se présenter; s'il était trop étroit, ou le ponceau serait emporté, ou l'eau s'élèverait du côté d'amont, se répandrait sur les terrains environnants, et pourrait couper la route en passant par-dessus.

Quand il existe déjà des ponceaux en amont ou en aval de celui à construire, leurs débouchés servent de terme de comparaison, et en ayant égard à la quantité d'eau qui afflue en plus ou en moins sous ce dernier, on peut fixer approximativement son débouché.

S'il n'y a encore aucun ponceau existant, il faut déterminer le volume de l'eau affluente. Pour cela, si le ravin a une section et une pente à peu près uniformes sur une certaine longueur, et si l'on connaît le niveau des plus hautes eaux, à l'aide de la formule d'Eytelwein ou de celle de M. de Saint-Venant (160), on détermine la vitesse moyenne $v$

en mètres par seconde, et cette vitesse multipliée par la section des eaux donne le volume d'eau affluent par seconde. Ayant ce volume, on fixe le débouché de manière que la vitesse de l'eau sous le pont ne soit pas assez grande pour attaquer le fond (161 et 162).

Quand le niveau des grandes eaux ne sera pas connu, et que la pente et la section du ravin ne seront pas assez régulières pour appliquer les formules du n° 160, on déterminera le débouché par la méthode empirique suivante, qui paraît avoir été sanctionnée par l'expérience pour des pays où le sol est peu perméable.

Dans les pays plats, comme la Hollande, la largeur du débouché se règle à raison de $0^m,45$ à $0^m,50$ pour chaque 1000 hectares du terrain dont les eaux affluent sous le ponceau. Si le sol est en pente, et que les plus grandes hauteurs qui environnent le bassin s'élèvent à environ 50 mètres au-dessus du talweg, la largeur du débouché se prend à raison de $1^m.25$ par 1000 hectares; il faut encore augmenter ce débouché si le bassin est resserré entre des montagnes très élevées et très-inclinées, parce que les eaux pluviales arrivent plus vite et en plus grande abondance sous le ponceau.

Si ces moyens de déterminer le débouché paraissaient incertains, on se rendrait compte de la plus grande quantité d'eau qui peut affluer sous le pont en une seconde, en supposant que les plus grands orages sont assez prolongés pour que le volume d'eau qui passe sous le pont en une seconde soit égal à celui qui tombe dans toute l'étendue du bassin dans le même temps, et que, d'après les observations les plus exactes, le maximum d'eau tombé en une seconde est de $0^{mc},000\,002$ par mètre carré. (Des observations faites par M. Mary, en 1843, lui ont donné $0^{mc},000\,006\,6$ par seconde, pendant une pluie abondante, qui n'était cependant pas un orage.)

Les observations faites pendant un grand nombre d'années ayant prouvé que des pluies de cette abondance ne durent jamais plus de 17 heures, il en résulte que, pour appliquer cette méthode, il faut que l'étendue du bassin soit assez faible, et sa pente assez grande, pour qu'en 17 heures la première eau tombée dans les points les plus éloignés du bassin ait eu le temps d'arriver au ponceau.

Dans un très-petit bassin, il peut arriver que le ponceau ait à débiter par seconde la quantité d'eau fournie par un orage ou une trombe d'eau sur le bassin dans ce même temps, diminuée du volume absorbé par le sol.

Les registres de l'observatoire de Paris indiquent que l'orage le plus abondant, parmi ceux observés, a fourni par mètre carré $0^{mc},01898$ en 30 minutes, ce qui fait par seconde $0^{mc},000\,010\,5$. Ces pluies abondantes ne durent pas beaucoup plus que celle-là.

Les cas où il afflue à la fois le plus grand volume d'eau sous le ponceau se présentent quand le sol étant gelé et couvert de neige il sur-

vient une pluie chaude, et quand le sol est peu perméable, soit par sa nature, soit par des pavages, soit par des parties couvertes d'édifices, et qu'il survient une pluie abondante.

Sur un sol naturel, il peut y avoir imbibition plus ou moins considérable suivant la formation géologique du terrain supérieur. Sur l'argile plastique, l'argile du gault, les argiles et les marnes argileuses du terrain jurassique, les granits et autres roches non fendillées, l'absorption est à peu près de 0,43 pour 1. Dans les terrains crayeux ou d'autres roches également fendillées, la pluie est presque entièrement absorbée. Lorsque le sol est recouvert de terre végétale sur une très-forte épaisseur, on admet, d'après d'assez nombreuses expériences, que l'eau qui coule à la surface est les 3/7 de l'eau de pluie.

Une fois que l'on a déterminé approximativement le volume des eaux, on se rend compte de la hauteur à laquelle elles s'élèveront dans le ravin à l'aide de la formule d'Eytelwein ou de celle de M. de Saint-Venant; la première est (160)

$$\frac{S}{P} I = 0{,}000\,024 \frac{Q}{S} + 0{,}000\,365 \frac{Q^2}{S^2}.$$

Il y a dans cette équation deux inconnues, la section S et le périmètre P, desquelles dépend la profondeur de l'eau.

Si la section S était un rectangle, on pourrait remplacer S et P en fonction de la profondeur, qui resterait seule comme inconnue dans l'équation précédente, et serait facilement déterminée.

Si la section S était un trapèze, on pourrait encore suivre une même marche; mais les valeurs de S et P en fonction de la profondeur seraient déjà compliquées, et ces valeurs substituées dans la formule précédente la rendraient difficile à résoudre. Il vaut mieux dans ce dernier cas suivre la marche adoptée pour une forme quelconque de section. Cette marche consiste à rapporter sur une feuille de papier le profil en travers du ravin, à assigner à la profondeur de l'eau une valeur que l'on préjuge convenable, à calculer la valeur de S qui correspond à cette profondeur, ce qui se fait en la décomposant en trapèzes et en triangles par des lignes verticales; on évalue également P, et les valeurs de S et P substituées dans l'équation précédente donnent pour Q la valeur que l'on a déterminée, si la valeur assignée à la profondeur est convenable; cela n'étant pas, on essaye une seconde profondeur, puis une troisième, et ainsi de suite, jusqu'à ce qu'on arrive à une valeur satisfaisante.

Ayant la profondeur de l'eau dans le ravin et le volume d'eau à débiter, on prend le débouché tel que sa largeur multipliée par la profondeur d'eau trouvée donne une section capable de débiter le volume Q, sans que la vitesse soit trop considérable.

Les ingénieurs qui auront à déterminer le débouché à donner à un

pont consulteront avec avantage les considérations que donne M. Dupuit dans son ouvrage (164).

Les ponceaux se font ordinairement en maçonnerie et quelquefois en bois. Dans ce dernier cas, les culées peuvent se faire avec des pieux; mais le bois qui les forme étant à l'air d'un côté et en contact avec la terre de l'autre, il se trouve dans un état de sécheresse et d'humidité variable qui le fait pourrir promptement.

Les voûtes des ponceaux se font en arc de cercle quand l'élévation des eaux ne permet pas de les construire en plein cintre.

Il arrive quelquefois que l'ouverture que l'on est obligé de donner à un ponceau est assez faible pour que l'eau y prenne une vitesse suffisante pour affouiller le sol. On évite cet affouillement en recouvrant le sol avec un *radier* en maçonnerie, que l'on prolonge, si cela est nécessaire, dans toute l'étendue du rétrécissement occasionné par le ponceau.

## PONTS EN PIERRE.

**617.** *Ponts en pierre.* Les ponts en charpente nécessitant des réparations coûteuses et de nature à intercepter trop souvent le passage, pour une voie très-fréquentée, sur laquelle les communications sont importantes, on a recours à la pierre et quelquefois à la fonte ou au fer.

Dans l'étude d'un projet de pont, on a à considérer : 1° l'emplacement du pont; 2° son débouché; 3° la grandeur de ses arches; 4° leur forme; 5° les dimensions de leurs différentes parties; 6° le mode de construction.

**618.** *Emplacement d'un pont.* Il est ordinairement déterminé par la position des deux voies que le pont doit mettre en communication. Cependant il peut arriver que le pont étant placé dans la direction d'une voie, il soit oblique par rapport à l'autre, ou que le niveau auquel se trouvent les voies exigerait de fortes rampes pour arriver au niveau auquel on est obligé d'élever le pont, ce qui enterrerait les maisons. Il peut arriver aussi que le sol où on aurait à construire conduirait à des dépenses considérables, ou encore que la direction des piles y serait oblique par rapport à celle du courant, ce qu'il faut éviter autant que possible, surtout pour un grand pont, parce qu'un pont biais, outre qu'il est plus difficile à appareiller, est aussi plus sujet aux affouillements. Dans ces divers cas, on doit rechercher si dans le voisinage il n'y aurait pas un point plus favorable sous le rapport de la commodité, de la solidité et de l'économie.

La largeur d'un pont dépend du nombre des personnes et des voitures qui circulent ou peuvent circuler dans les rues ou sur les routes qu'il doit réunir. Dans une ville, la largeur doit en général être au moins égale à celle des rues qui y aboutissent. A la campagne, cette largeur

doit ordinairement permettre, surtout si le pont est un peu grand, à deux voitures de se croiser; cela oblige de la porter à 5 mètres; on lui donne ordinairement 7 à 8 mètres si le pont est long, et on fait un trottoir de chaque côté pour les piétons.

619. *Débouché.* Sur une rivière considérable, la détermination du débouché est de la plus haute importance Dans un ponceau, un radier permet de rétrécir le débouché au point d'obtenir une vitesse qui entraînerait le sol naturel (616); mais dans un grand pont, sauf des cas exceptionnels, il faut renoncer au radier, et calculer le débouché tel qu'il puisse débiter les eaux sans que leur vitesse atteigne la limite à laquelle elles attaqueraient le fond (161), produiraient des affouillements, déracineraient les points d'appui et amèneraient la chute du pont.

Il faut aussi éviter que le débouché du pont soit trop grand, parce qu'il pourrait se former des atterrissements en quelques points de sa longueur, lesquels, en se consolidant par les herbages qui y pousseraient, pourraient faire prendre au courant une direction oblique, et une grande crue survenant, le pont pourrait être détruit par suite de l'affouillement de quelques piles; c'est ce qui est arrivé à Roanne et à Nevers. Cependant, le cas de destruction par suite d'un débouché trop grand étant beaucoup plus rare que celui provenant d'un débouché trop faible, il y a moins de danger de pécher dans le premier sens que dans le second.

Pour arriver à fixer convenablement le débouché, il faut jauger le cours d'eau avec soin, d'après ce qui a été dit n^os^ 160, 161 et 162, pendant les basses, les grandes et les moyennes eaux, en déterminant directement la vitesse au moyen de flotteurs, quand la saison et le temps le permettent, ou au moyen des formules dans le cas contraire (616). Du jaugeage pendant les basses eaux, on conclut un débouché qui ne permet pas les atterrissements, de celui fait pour les grandes crues on s'assure que le débouché peut débiter toutes les eaux sans que la vitesse soit trop grande, et le jaugeage pendant les eaux moyennes donne la direction du régime ordinaire des eaux.

Ayant dans chacun de ces cas le niveau des eaux pour chaque débouché ou espace libre entre les piles et culées, on a la section des eaux, et le volume divisé par cette section donne la vitesse moyenne, qui ne doit pas permettre les atterrissements, ni pouvoir corroder le sol.

Il est évident que si la rivière débordait au point où l'on doit construire, son jaugeage ne pourrait s'effectuer en cet endroit pendant les grandes eaux; on le ferait alors en un point situé à une certaine distance en amont ou en aval, où la rivière serait parfaitement encaissée.

Lorsque les eaux s'élèvent au-dessus du niveau des naissances des

voûtes, il faut avoir égard à ce que le débouché ne croît plus en raison de la hauteur des ouvertures, et pour cela augmenter en conséquence l'écartement des appuis. On augmente aussi cette distance pour avoir égard à la contraction de l'eau dans les ouvertures du pont (620).

**620.** *Remou.* Par suite du rétrécissement de la rivière, causé par les piles, le niveau de l'eau s'élève d'une certaine quantité en amont du pont. Il est important de déterminer cet exhaussement, appelé *remou*, afin de s'assurer qu'il ne causera pas de dommages aux propriétés riveraines.

Appelons :

- $L$ la largeur de la rivière en avant du pont :
- $l$ la largeur totale des piles ;
- $x$ le remou ;
- $h$ la profondeur moyenne de la rivière en amont du remou ; la profondeur est sensiblement la même entre les piles du pont ;
- $h+x$ la profondeur de l'eau au devant des piles ;
- $k$ le coefficient de contraction qui résulte du passage de l'eau entre les piles ; Eytelwein fait $k = 0.85$ pour les avant-becs coupés carrément, et $k=0,95$ pour ceux terminés en angle aigu ; on fait $k=0.90$ pour la forme usitée aujourd'hui (139) ;
- $v$ la vitesse en amont du remou ;
- $v'$ la vitesse de l'eau au point du grand exhaussement du niveau de l'eau ;
- $v''$ la vitesse de l'eau entre les piles, ou mieux au point de plus grande contraction ;
- $Q$ le débit de la rivière par seconde.

Le débit Q étant le même au point où il n'y a ni remou ni rétrécissement qu'aux points où ces effets se produisent, on a à la fois

$$Q = Lhv = L(h+x)v' = (L-l)hv''k.$$

Des deux premières valeurs de Q on conclut

$$v' = \frac{Lhv}{L(h+x)} = \frac{hv}{h+x},$$

et de la première et de la troisième on tire

$$v'' = \frac{Lv}{(L-l)k}.$$

Le remou doit être égal à la différence des hauteurs génératrices des vitesses $v'$ et $v''$ ; on a donc

$$x = \frac{v''^2 - v'^2}{2g}. \qquad (133)$$

Remplaçant dans cette équation $v'$ et $v''$ par leurs valeurs précédentes, on a

$$x = \frac{v^2}{2g}\left(\frac{L^2}{(L-l)^2k^2} - \frac{h^2}{(h+x)^2}\right).$$

Équation du troisième degré qui ne contient que la seule inconnue $x$, et qu'il convient de résoudre par tâtonnement; ainsi, on assignera à $x$, dans le second membre de l'équation, une valeur que l'on préjugera convenable; l'équation, qui sera alors du premier degré, donnera pour $x$ une seconde valeur plus exacte que celle supposée; cette deuxième valeur, substituée dans le second membre de l'équation, en fournira une troisième que l'on pourra considérer comme satisfaisant exactement à l'équation, et qu'en pratique on pourra adopter comme étant la hauteur du remou.

Si l'on a, comme dans une expérience faite sur le Veser, et rapportée par M. d'Aubuisson, $L = 180^m,71$, $l = 84^m,58$, $h = 5^m,37$ et $v = 1^m,494$; supposant $k = 0,90$, et faisant $x = 0^m,25$, par exemple, dans le second membre de l'équation précédente, on a

$$x = \frac{1,494^2}{19,62}\left(\frac{180,71^2}{(180,71 - 84,58)^2 \times 0,9^2} - \frac{5,37^2}{(5,37 + 0,25)^2}\right) = 0^m,393.$$

Cette valeur substituée dans le second membre de l'équation donnerait $x = 0^m,398$, valeur que l'on peut considérer comme satisfaisant exactement à l'équation, et qui ne diffère pas sensiblement de celle $0^m,382$ qu'a donnée l'expérience. (On pourra consulter avec fruit, pour cette question de remou, le travail de M. Belanger : *Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement des eaux courantes*, et l'ouvrage de M. Dupuit) (164).

**621.** *Grandeur des arches.* Sur une rivière qui n'est ni navigable ni exposée à des crues ou à des débâcles, on adopte de petites arches, qui, à longueur égale de pont, sont moins coûteuses que les grandes, quand toutefois la nature du sol ne conduit pas à de plus fortes dépenses par suite du plus grand nombre de piles à fonder.

Quand la rivière, sans être navigable, est sujette à des crues et à des débâcles, on doit adopter des arches assez grandes pour que les glaces ou tout autre corps flottant ne soient pas arrêtées par les piles; il en résulterait des amas de glaces, appelés *embâcles*, qui sont une des causes les plus fréquentes de la destruction des ponts. Il ne faut pas en général adopter des arches moindres que celles du premier pont placé en amont.

Sur une rivière navigable, il faut proportionner les arches aux dimensions des bateaux, et surtout à la vitesse du courant. Si cette vitesse est grande, le débouché ayant moins de 25 mètres, on ne fait qu'une seule arche. Pour un plus grand débouché, afin d'éviter les dépenses considérables occasionnées par les grandes arches, on en fait de plus petites. Le nombre des arches doit être de trois au moins, sauf à faire l'arche du milieu plus grande que les autres, si elle était insuffisante pour la navigation.

Quand la rivière navigable a une faible pente, la largeur des arches

peut être moindre, et on peut même adopter un nombre pair d'arches, c'est-à-dire placer une pile au milieu, si cette disposition offre des avantages d'exécution compensant ses inconvénients.

**622.** *Forme des arches.* La surface intérieure des voûtes est engendrée par une droite qui se meut en restant horizontale et en s'appuyant sur une demi-circonférence dont le diamètre est égal à l'ouverture de l'arche, ce qui donne une voûte en *plein cintre;* ou sur une ellipse ou une courbe à plusieurs centres, dont les extrémités sont, comme dans le cas précédent, tangentes aux pieds-droits, ce qui fournit une voûte en *anse de panier;* ou encore sur un seul arc de cercle rencontrant les pieds-droits suivant un certain angle, et on a alors une voûte en *arc de cercle.*

Les voûtes en plein cintre étant les plus faciles à appareiller et les plus solides, on les construit toutes les fois qu'elles laissent un passage suffisant à l'eau et aux bateaux jusqu'au moment où la rivière cesse d'être navigable, sans porter le pont à une hauteur que ne permettent pas ses abords. Quand ces conditions ne peuvent être convenablement remplies par les voûtes en plein cintre, on fait usage de voûtes en anse de panier, et si celles-ci ne laissent pas encore un débouché convenable on a recours aux voûtes en arc de cercle.

Les *naissances* d'une voûte sont les points où elles se raccorde avec les pieds-droits. La *montée* ou la *flèche* est la hauteur verticale de la clef au-dessus des naissances. Dans les voûtes en arc de cercle, il faut tenir les naissances au-dessus du niveau auquel atteignent les débâcles, pour qu'elles ne soient pas dégradées par les glaces et qu'elles ne rétrécissent pas le débouché. Il est difficile de satisfaire complétement à cette condition dans les voûtes en plein cintre et en anse de panier; du reste, pour une certaine élévation de niveau, au-dessus des naissances, le débouché est moins rétréci par ces voûtes que par celles en arc de cercle. Pour remédier jusqu'à un certain point à l'effet de ce rétrécissement, on a imaginé, aux ponts de Neuilly, Bordeaux, etc., d'évaser la voûte sur les plans de tête, de manière à surhausser les naissances dans ces plans jusqu'au niveau des plus hautes eaux, tout en laissant la clef à la même hauteur que dans la partie cylindrique de la voûte. Dans son mouvement, la génératrice de chacune de ces parties évasées passe successivement dans tous les plans normaux à la partie cylindrique de la voûte.

**623.** *Tracé des arches.* Les tracés des voûtes en plein cintre et en arc de cercle n'offrent aucune difficulté. Dans ces dernières, si l'on désigne par $m$ la montée, par $l$ la demi-ouverture du pont, et par $r$ le rayon de l'arc, on a

$$r = \frac{l^2 + m^2}{2m}.$$

Il ne faut prendre, dans aucun cas, la montée moindre que 1/8 de l'ouverture. Cependant le *pont aux Doubles* et le *petit Pont*, à Paris, établis en meulière hourdée avec du ciment de Vassy, sont surbaissés au 1/10.

Le tracé de l'anse de panier, dont la forme se rapproche de celle de l'ellipse (*Int.*, 1041), est un peu plus difficultueux que les précédents. Les arcs en nombre impair dont il se compose doivent se raccorder tangentiellement à leurs extrémités, afin d'éviter les jarrets, et de plus être décrits avec des rayons convenablement proportionnés, afin que leur ensemble forme une courbe bien continue ne paraissant pas s'infléchir aux points de contact des arcs. Pour que ces conditions soient le plus convenablement remplies, les centres de deux arcs successifs doivent se trouver sur le même rayon passant par le point de contact des deux arcs, et les rayons aboutissant à ces points de contact doivent faire des angles égaux entre eux, et égaux au quotient de deux angles droits ou de 180° par le nombre des arcs qui composent la courbe ; ainsi, lorsque l'anse de panier est à 3, 5, 7, etc., centres, les divers rayons font respectivement entre eux des angles de 60°, 36°, 25°,714, et de plus les rayons doivent, d'après la méthode de M. Michal, inspecteur général des ponts et chaussées, être égaux au rayon de courbure de l'ellipse qui a les mêmes axes que l'anse de panier.

C'est d'après ces hypothèses que M. Michal a calculé le tableau suivant, qui donne pour diverses montées les valeurs des rayons nécessaires pour effectuer le tracé ; ces valeurs sont données en prenant l'ouverture pour unité.

| ANSES A 5 CENTRES. | | ANSES A 7 CENTRES. | | | ANSES A 9 CENTRES. | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Montée. | 1er rayon. | Montée. | 1er rayon. | 2e rayon | Montée. | 1er rayon. | 2e rayon. | 3e rayon. |
| 0.36 | 0.278 | 0.33 | 0.228 | 0.315 | 0.25 | 0.130 | 0.171 | 0.299 |
| 0.35 | 0.265 | 0.32 | 0 216 | 0.302 | 0.24 | 0.120 | 0 159 | 0.278 |
| 0.34 | 0.252 | 0.31 | 0.203 | 0.289 | 0.23 | 0.111 | 0.148 | 0.268 |
| 0.33 | 0.239 | 0.30 | 0.192 | 0.276 | 0.22 | 0.102 | 0.138 | 0.252 |
| 0.32 | 0.225 | 0.29 | 0.180 | 0.263 | 0.21 | 0.093 | 0.126 | 0 237 |
| 0.31 | 0.212 | 0.28 | 0.168 | 0.249 | 0.20 | 0.083 | 0.114 | 0.222 |
| 0.30 | 0.198 | 0.27 | 0.156 | 0.236 | | | | |
| | | 0.26 | 0.145 | 0.223 | | | | |
| | | 0.25 | 0.133 | 0.210 | | | | |

Soit, fig. 25, pl. III, *aa'* l'ouverture, et *cd* la montée. Quand *aa'* est moindre que 3*cd*, on emploie l'anse de panier à 3 centres. Pour la tracer, sur *aa'* comme diamètre, on décrit une demi-circonférence, que l'on divise en trois parties égales par les rayons *ce* et *ce'* ; on mène les cordes *ae*, *ef*, *fe'* et *e'a'* ; par le point *d* on conduit *dh* parallèle à *fe*

et $dh'$ parallèle à $fe'$, et les lignes $hi$ et $h'i$, menées respectivement parallèles à $ce$ et $ce'$, déterminent les trois centres $k$, $i$ et $k'$, et par suite les rayons $ak = a'k'$ et $hi$ de l'anse de panier $ahh'a'$. D'abord les centres de deux arcs consécutifs sont bien placés sur le même rayon aboutissant au point de raccordement des arcs. De plus, deux rayons consécutifs font entre eux un angle de $\frac{180}{3} = 60°$; car on a

$$akh = ace,\ hih' = ece' \text{ et } h'k'a' = e'ca'.$$

Pour tracer une anse de panier à 5 centres, on suit la même marche, Ainsi, après avoir, fig. 26, pl. III, mené les rayons $cd$, $ce$, $ce'$ et $cd'$, divisant la circonférence $aba'$ en 5 parties égales, et les cordes $ad$, $de$, $eb$, etc., on prend le premier rayon $af$ égal à la valeur consignée au tableau précédent, et on mène $gh$ parallèle à $cd$. Conduisant ensuite $hi$ parallèle à $de$ et $li$ parallèle à $be$, puis $ik$ parallèle à $ce$, on obtient le deuxième centre $g$ et le troisième $k$. Le tracé est le même de l'autre côté de $cl$; mais on peut pour ce côté commencer par le rayon $ki'$, le point $k$ étant connu.

Pour une anse de panier à 7 centres, on opérerait d'une manière semblable. Ainsi on prendrait $af$ égal au premier rayon du tableau, on mènerait $hg$ parallèle au premier rayon diviseur $cd$; on prendrait ensuite $hg$ égal au deuxième rayon consigné au tableau, on mènerait par $g$ une parallèle au deuxième rayon diviseur, et les troisième et quatrième centres se détermineraient de la même manière que les deuxième et troisième $g$ et $k$ dans le cas précédent. On opérerait d'une manière tout à fait semblable pour une anse de panier à 9 centres, et en général pour un nombre impair quelconque de centres.

M. Lerouge, ingénieur en chef des ponts et chaussées, a, pour tracer les anses de panier, toujours supposé que les divers rayons passant par les points de raccordement feraient des angles égaux entre eux, mais que les rayons croîtraient suivant une progression arithmétique. C'est d'après cette hypothèse qu'il a calculé les résultats du tableau suivant, qui supposent l'ouverture prise pour unité. Ce tableau contient en outre la hauteur réduite du débouché enveloppé par la courbe, l'ouverture étant également prise pour unité.

| ANSES A 3 CENTRES. | | | | ANSES A 5 CENTRES. | | | | ANSES A 7 CENTRES. | | | | ANSES A 9 CENTRES. | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Montee. | Premier rayon. | Différ. des rayons successifs. | Hauteur réduite. | Montée. | Premier rayon. | Différ. des rayons successifs. | Hauteur réduite. | Montée. | Premier rayon. | Différ. des rayons successifs. | Hauteur réduite. | Montée. | Premier rayon. | Différ. des rayons successifs. | Hauteur réduite. |
| 0.380 | 0.336 | 0.327 | 0.303 | 0.350 | 0.245 | 0.228 | 0.274 | 0.330 | 0.183 | 0. 1 8 | 0.256 | 0.320 | 0.148 | 0.148 | 0.246 |
| 0.390 | 0.350 | 0.301 | 0.310 | 0.360 | 0.262 | 0.213 | 0.282 | 0340 | 0.202 | 0.171 | 0.264 | 0.330 | 0.167 | 0.140 | 0.255 |
| 0.400 | 0.363 | 0.273 | 0.318 | 0.370 | 0.279 | 0.198 | 0.290 | 0.350 | 0.221 | 0.160 | 0.272 | 0.340 | 0.187 | 0.132 | 0.263 |
| 0.410 | 0.377 | 0.246 | 0.326 | 0.380 | 0.296 | 0.183 | 0.298 | 0.360 | 0.239 | 0.149 | 0.281 | 0.350 | 0.206 | 0.123 | 0.272 |
| 0.420 | 0.391 | 0.219 | 0.334 | 0.390 | 0.313 | 0.167 | 0.306 | 0.370 | 0.258 | 0.139 | 0.289 | 0.360 | 0.226 | 0.115 | 0.280 |
| 0.430 | 0.404 | 0.191 | 0.341 | 0.400 | 0.330 | 0.152 | 0.315 | 0.380 | 0.276 | 0.128 | 0.297 | 0.370 | 0.245 | 0.107 | 0.288 |
| 0.440 | 0.418 | 0.164 | 0.349 | 0.410 | 0.347 | 0.137 | 0.323 | 0.390 | 0.295 | 0.117 | 0.305 | 0.380 | 0.265 | 0.099 | 0.297 |
| 0.450 | 0.432 | 0.137 | 0.356 | 0.420 | 0.364 | 0.122 | 0.330 | 0.400 | 0.314 | 0.107 | 0.313 | 0.390 | 0.285 | 0.091 | 0.305 |
| 0.460 | 0.445 | 0.109 | 0.364 | 0.430 | 0.381 | 0.107 | 0.338 | 0.410 | 0.332 | 0.096 | 0.322 | 0.400 | 0.304 | 0 082 | 0.313 |
| 0.470 | 0 459 | 0.082 | 0.371 | 0.440 | 0.398 | 0.091 | 0.346 | 0.420 | 0.351 | 0.085 | 0.330 | 0.410 | 0.324 | 0.074 | 0.321 |
| 0.480 | 0.473 | 0.055 | 0.378 | 0.450 | 0.416 | 0.077 | 0.354 | 0.430 | 0.370 | 0.075 | 0.338 | 0.420 | 0.343 | 0.066 | 0.329 |
| 0.490 | 0.486 | 0.027 | 0.386 | 0.460 | 0.432 | 0.061 | 0.362 | 0.440 | 0.388 | 0.064 | 0.346 | 0.430 | 0.363 | 0.058 | 0.337 |
| 0.500 | 0.500 | 0.000 | 0.393 | 0.470 | 0.449 | 0.046 | 0.370 | 0.450 | 0.407 | 0.053 | 0.354 | 0.440 | 0.383 | 0.049 | 0.345 |
| | | | | 0.480 | 0.466 | 0.030 | 0.377 | 0.460 | 0.425 | 0.043 | 0.361 | 0.450 | 0.402 | 0.041 | 0.353 |
| | | | | 0.490 | 0.483 | 0.015 | 0.385 | 0.470 | 0.444 | 0.032 | 0.369 | 0.460 | 0.422 | 0.033 | 0.361 |
| | | | | 0.500 | 0.500 | 0.000 | 0.393 | 0.480 | 0.463 | 0.021 | 0.377 | 0.470 | 0.441 | 0.025 | 0.369 |
| | | | | | | | | 0.490 | 0.481 | 0.011 | 0.385 | 0.480 | 0.461 | 0.016 | 0.377 |
| | | | | | | | | 0.500 | 0.500 | 0.000 | 0.393 | 0.490 | 0.480 | 0.008 | 0.385 |
| | | | | | | | | | | | | 0.500 | 0.500 | 0.000 | 0.393 |

Ajoutant la différence des rayons successifs au premier rayon, on a le deuxième; cette différence ajoutée au deuxième rayon donne le troisième, et ainsi de suite. A l'aide de ces divers rayons on fera le tracé comme il a été indiqué plus haut.

Au pont de Neuilly, on a employé une anse de panier à 11 centres, que l'on a tracée comme l'indique la figure 27, pl. III.

On prend un point $k$, que l'on croit devoir être le premier centre, et on divise $fk$ de manière que $kj = \frac{ji}{2} = \frac{ih}{3} = \frac{hg}{4} = \frac{gf}{5}$. Cela fait, on prend $fa = 3fk$; on divise $fa$ en 5 parties égales, aux points $e$, $d$, $c$, $b$; on joint $ek$, $dj$, $ci$, $bh$ et $ag$, et si le point $k$ a été bien choisi, la courbe ayant pour centres successifs les points $k$, $r$, $o$, $m$, $n$, $a$, passera par le sommet $q$ de la montée. On conçoit que ce n'est que par tâtonnement que l'on arrivera à la position convenable du point $k$. Supposons que l'on a fait une première hypothèse, et que le point $k$ choisi ne convienne pas; on aura la valeur convenable $x$, de $fk$, à l'aide de la formule

$$x = \frac{m(a-b)}{4m-s}.$$

$a = fl$ demi-ouverture;
$b = fq$ montée;
$m$ valeur qu'on a prise pour $fk$ dans la première hypothèse;
$s$ développement de la ligne brisée *anmork* qu'a donnée la première hypothèse.

Dans plusieurs ponts nouvellement construits on a adopté l'ellipse pour directrice de l'intrados et de l'extrados (635 et 636).

624. *Formes des piles. Fondations.* Ce qui a été exposé au n° 561 comprend comme cas particulier la fondation des ponts.

La coupe horizontale des piles proprement dites est un rectangle; mais on les termine en amont et en aval par un massif de maçonnerie faisant saillie sur les têtes du pont; le massif d'amont s'appelle *avant-bec*, et celui d'aval *arrière-bec*. Ces becs s'élèvent jusqu'au-dessus des plus hautes eaux, afin qu'ils préservent complétement le massif de la pile du choc des corps flottants; ainsi, dans les ponts en plein cintre et en anse de panier, ils peuvent s'élever au-dessus des naissances; dans les ponts en arc de cercle on les termine aux naissances, les eaux ne s'élevant pas plus haut. On les surmonte de demi-cônes qui les raccordent avec les *tympans* du pont.

Le fruit des piles ne doit pas être supérieur à 1/20 ou 1/15.

Les becs ne sont pas seulement destinés à préserver les massifs des piles du choc des corps flottants; mais aussi à faciliter, par leur forme, le passage de l'eau, de manière à diminuer la contraction et les tourbillonnements de l'eau et par suite les affouillements (620). Il est évident que les formes qui doivent le mieux satisfaire à ces conditions sont celles qu'il convient de donner aux proues et poupes verticales, pour faciliter

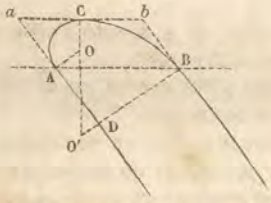
le mouvement des bateaux (378). Par des expériences directes sur des piles de $0^m,15$ d'épaisseur et de diverses formes, le canal ayant $0^m,50$ de largeur, l'eau y circulant sur une épaisseur de $0^m,04$, avec une vitesse de $3^m,90$ par seconde, Gauthey a reconnu que la forme rectangulaire était la plus défavorable, que la forme d'un triangle rectangle favorisait peut-être encore plus les affouillements, que celle en demi-cercle était un peu plus préférable, que le triangle équilatéral l'était davantage, et qu'une forme, plus convenable encore que cette dernière, était celle composée de deux arcs de cercle tangents aux faces de la pile et ayant leurs centres respectivement sur ces faces.

Dans des expériences sur l'avant-bec formé de deux arcs de cercle, on a fait descendre les naissances au-dessous du niveau de l'eau; alors le remou a été considérable, et les courants ont divergé à peu près autant que dans les expériences faites avec les avant-becs rectangulaires.

Ces expériences conduisent à adopter la forme triangulaire équilatérale, ou mieux la forme en arcs de cercle; mais les angles aigus qu'elles présentent aux chocs des glaces et des autres corps flottants sont promptement endommagés; aussi donne-t-on en général la préférence aux avant-becs demi-circulaires.

Une forme elliptique concilierait en partie les avantages de la forme circulaire et de celle en arcs de cercle.

Fig. 88.




Pour un pont biais, on emploie deux arcs de cercle, AC et BC, tangents aux faces de la pile et, en un même point C, à une droite *ab* parallèle à la tête AB du pont. Menant *ab* parallèle à AB à une distance égale à la moitié de l'épaisseur BD de la pile, et élevant au point C, milieu de *ab*, une perpendiculaire, elle détermine sur les perpendiculaires AO et BO′ aux faces de la pile, les centres O et O′ des arcs AC et BC.

**625.** *Appareil des voûtes.* Les voussoirs sont en nombre impair, et celui qui forme clef doit se trouver au milieu; leurs plans de joints sont normaux à la surface cylindrique de la voûte, et on ne les raccordait avec la maçonnerie qui les surmonte que par des faces horizontales et verticales, mais dans les ponts que l'on construit aujourd'hui, la courbe d'extrados est le plus généralement continue comme celle d'intrados. Les dimensions des voussoirs dépendent de celles des pierres que l'on a à sa disposition; cependant il ne faut pas que leur longueur soit trop grande par rapport à leur épaisseur, parce qu'ils se rompraient; il faudrait dans ce cas les composer de plusieurs morceaux. Au pont de Neuilly, les voussoirs, qui sont les plus longs que l'on ait employés, ont $1^m,80$ de longueur sur $0^m,46$ d'épaisseur à la *douelle*, c'est-à-dire à la surface intérieure de la voûte (560).

**626.** *Dimensions des voûtes. Joints de rupture.* Lorsque les dimensions d'une voûte et de ses culées sont réduites au point de ne pouvoir se soutenir, on remarque, au moment où l'équilibre va se rompre, qu'en général la voûte s'ouvre, comme l'indique la fig. 28, pl. III, à l'intrados à la clef, à l'extrados en des points placés dans les *reins* de la voûte, et que les pieds-droits tournent autour de l'arête extérieure de leur base.

Quelquefois, à la rupture, on remarque que la voûte se fend à la clef et dans les reins, mais sans s'ouvrir, et que les pieds-droits glissent sur leur base.

Il est encore un troisième cas possible, c'est celui où le voussoir inférieur, c'est-à-dire l'ensemble du pied-droit et de la partie de voûte inférieure au rein, exerce, pour tomber en avant, un effort plus grand que celui produit par le voussoir supérieur pour le faire tourner en sens contraire. Alors la voûte s'ouvre comme dans le premier cas, mais à l'extrados à la clef, à l'intrados aux reins, et les pieds-droits tournent autour de l'arête intérieure de leur base (fig. 29, pl. III).

Une voûte peut être considérée comme composée de 4 voussoirs séparés par les joints où la rupture est possible, et qui doivent mutuellement se maintenir en équilibre.

1° Examinons d'abord le *premier cas*, celui où il y a affaissement de la voûte et renversement des pieds-droits, fig. 28, pl. III. Au moment où l'équilibre se rompt, on peut supposer théoriquement que les voussoirs ne reposent plus entre eux et sur le sol que par des arêtes $a$, $b$, $b'$, $c$ et $c'$ ; alors $ab$, $bc$, $ab'$ et $b'c'$ sont entre eux dans le même état d'équilibre que des droites rigides $ab$, $bc$, $ab'$ et $b'c'$, dont les poids sont ceux des voussoirs, et dont les centres de gravité sont placés aux points G', $g'$, etc., situés sur les verticales passant par les centres de gravité G, $g$, etc., des voussoirs. (*Int.* 1135 et suiv.)

Il convient, pour abréger les calculs relatifs à la poussée des voûtes, de ne considérer qu'une tranche de voûte de 1 mètre de longueur ; s'il y a équilibre sur 1 mètre, il est évident que l'équilibre subsistera sur toute l'étendue de la voûte.

*Représentons :* $ad$ par $x$, $de$ par $x'$, $ef$ par $y$, $fc$ par $y'$, $bh$ par $z$ et $ci$ par $z'$,
Soit P le poids du voussoir $ab$ et Q celui du voussoir $bc$.

Le poids P, que l'on peut supposer appliqué en G' ou même en $h$, se décompose en deux forces verticales, l'une $P\frac{z}{x}$ appliquée en $a$, et l'autre $P\frac{x-z}{x}$ appliquée en $b$. Le poids Q, que l'on peut supposer appliqué en $g'$ ou même en $i$, se décompose également en deux forces verticales, l'une $Q\frac{z'}{x'}$ appliquée en $b$, et l'autre $Q\frac{x'-z'}{x'}$ appliquée en $c$. Les vous-

soirs $ab'$ et $b'c'$ fournissent les mêmes composantes, appliquées respectivement aux points $a$, $b'$ et $c'$.

Ainsi au point $a$ agit une force verticale $2P\frac{z}{x}$, laquelle se décompose en deux forces égales, dirigées l'une suivant $ab$ et l'autre suivant $ab'$. Représentant par C chacune de ces composantes, on a

$$C : 2P\frac{z}{x} = ab \text{ ou } \sqrt{x^2+y^2} : 2y, \text{ d'où } C = P\frac{z\sqrt{x^2+y^2}}{xy}.$$

La force C, agissant suivant $ab$, peut être supposée appliquée au point $b$, où elle se décompose en deux autres :

L'une verticale et égale à $P\frac{z}{x}$;

L'autre horizontale et égale à $P\frac{z\sqrt{y^2+x^2}}{xy} \times \frac{x}{\sqrt{x^2+y^2}} = P\frac{z}{y}$.

Considérant alors le voussoir $bc$, on voit qu'il est sollicité par la force horizontale $P\frac{z}{y}$ appliquée au point $b$, et par les forces verticales Q, $P\frac{x-z}{x}$ et $P\frac{z}{x}$ appliquées la première au point $g$ et les dernières au point $b$; par conséquent, pour que ce voussoir ait de la stabilité, on doit avoir

$$Qz' + \left(P\frac{x-z}{x} + P\frac{z}{x}\right)x' - P\frac{z}{y}y' > 0,$$

ou en simplifiant,

$$Qz' + Px' - P\frac{zy'}{y} > 0. \qquad (a)$$

Ajoutant $Pz - Pz$ au premier membre de cette inégalité, on a

$$Qz' + P(x'+z) - \left(Pz + P\frac{zy'}{y}\right) > 0.$$

$Qz'$ est le moment du voussoir $bc$, pris par rapport au point $c$, $P(x'+z)$ est le moment du voussoir $ab$, pris par rapport au même point ; par conséquent la somme de ces deux expressions est égale au moment total MA de la demi-voûte, pris par rapport au point $c$, (*Int.*, 1407 et suivants.)

M = Q + P poids de la demi-voûte ;
A distance horizontale du centre de gravité de la demi-voûte au point $c$.

Le dernier terme du premier membre de l'inégalité précédente devient, en réduisant au même dénominateur,

$$Pz\frac{y+y'}{y} = PH\frac{z}{y}.$$

$H = y + y'$ hauteur totale de la voûte.

L'inégalité précédente devient donc en définitive

$$MA - PH\frac{z}{y}, \text{ ou } H\left(\frac{MA}{H} - P\frac{z}{y}\right) > 0.$$

Ainsi il y aura rupture quand le terme négatif sera plus grand que le terme positif, équilibre quand il lui sera égal, et on obtiendra une stabilité d'autant plus grande qu'il deviendra plus petit relativement à ce terme positif.

Le terme $\frac{MA}{H}$ étant constant, et celui $\frac{Pz}{y}$ étant seul variable, il est évident que si une voûte doit se rompre, ce sera au point pour lequel $P\frac{z}{y}$ est maximum ; ainsi la première chose à faire pour s'assurer qu'une voûte projetée résistera, c'est de déterminer la position du joint qui donne $P\frac{z}{y}$ maximum.

Il convient de remarquer que dans cette recherche on n'a à considérer que le voussoir supérieur, et que les joints pour lesquels on doit calculer les valeurs correspondantes de P, $y$ et $z$ doivent être choisis voisins du joint qu'à l'œil on suppose devoir être celui de rupture. Il convient aussi, pour abréger les calculs, d'observer que les valeurs de P étant proportionnelles aux surfaces correspondantes de la section de la voûte, et que les valeurs de $z$ et de $y$ données par ces surfaces étant les mêmes que celles des portions correspondantes de la voûte, on peut opérer sur ces surfaces pour déterminer les valeurs successives de $y$ et $z$, et que la position du joint de rupture sera déterminée par la valeur maximum du produit de $\frac{z}{y}$ par la surface correspondante.

Si l'on arrivait à une valeur de $P\frac{z}{y}$ trop grande, on augmenterait la largeur des pieds-droits de manière à faire croître convenablement MA.

Ce qui vient d'être dit s'applique aux voûtes surbaissées comme à celles en plein cintre.

Dans tout ce qui précède, nous avons supposé que la voûte n'avait à supporter que son propre poids ; mais ordinairement elle est surmontée d'un massif de maçonnerie formant une surface horizontale au-dessus de la voûte et des pieds-droits ; de plus encore, ce massif supporte ordinairement une surcharge accidentelle ou permanente.

Dans ces divers cas, les poids P, Q et M comprennent non-seulement ceux des parties correspondantes de la voûte proprement dite, mais

aussi ceux des massifs de maçonnerie et les portions de surcharge qui reposent sur ces parties de la voûte. On a également égard à ces poids additionnels en déterminant les positions des centres de gravité.

Il convient de faire l'épure qui sert à déterminer le joint de rupture à une grande échelle; cela aide à fixer la position des centres de gravité, et à calculer les surfaces et par suite les poids des diverses parties de voûte que l'on a à considérer.

2° *Le deuxième cas de rupture d'une voûte* a lieu lorsque, par l'effet de la force horizontale maximum $P\frac{z}{y}$ du voussoir agissant, la culée ou pied-droit glisse sur sa base. Il est évident que ce glissement ne pourra s'effectuer lorsqu'on aura

$$MK > P\frac{z}{y}.$$

K coefficient du frottement de la culée sur sa base; on peut le faire égal à 0.76 (60 à 62).

Les autres lettres ont les mêmes significations qu'au cas précédent.

3° *Le troisième cas de rupture d'une voûte* se présente quand, par la forme de la voûte ou par le mode de réparation de la charge, les pieds-droits tendent à tomber en avant; alors, la voûte s'ouvre à l'intérieur aux reins et à l'extérieur à la clef, comme l'indique la figure 29, planche III. Ce cas peut être considéré comme exceptionnel, et on pourra généralement se dispenser de faire les calculs suivants.

On établit les conditions d'équilibre comme dans le premier cas, en prenant pour axes de rotation des voussoirs les points $a$, $b$, $c$, et pour qu'il y ait stabilité, on trouve que l'on doit avoir

$$H\left(P\frac{z}{y} - \frac{MA}{H}\right) > 0, \text{ c'est-à-dire } P\frac{z}{y} > \frac{MA}{H}.$$

H$=ad$ hauteur de la voûte mesurée à l'intrados;
M poids de la demi-voûte;
A distance horizontale du centre de gravité de la demi-voûte au point de rotation $c$;
P poids du voussoir agissant $ab$:
$z$ distance horizontale du centre de gravité du voussoir agissant au point de rotation $b$;
$y$ distance des points de rotation $a$ et $b$.

Si l'on n'arrivait pas à $P\frac{z}{y} > \frac{MA}{H}$, on ajouterait un massif de maçonnerie au pied-droit, en dehors de l'arête $c$. Dans ce troisième cas de rupture de voûte, ainsi que dans le deuxième, on a, comme au premier cas, égard à la maçonnerie et à la surcharge qui peuvent reposer sur la voûte.

627. *Épaisseur des voûtes à la clef.* La méthode exposée dans le

numéro précédent est une méthode de tâtonnement, puisque l'on part d'une hypothèse sur l'épaisseur de la voûte. Afin de ne pas faire cette supposition au hasard, on a recours à la formule empyrique suivante, que Perronnet a déduite de ses observations,

$$e = 0{,}0347\,d + 0^{m},325.$$

$e$ épaisseur de la voûte à la clef en mètres ;

$d$ distance des pieds-droits, si la voûte est en plein cintre ; dans les voûtes surbaissées, $d$ exprime le double du rayon qui a servi à tracer l'intrados dans les voûtes en arc de cercle, et l'arc supérieur de l'intrados dans les voûtes en anse de panier.

Comme, pour des valeurs de $d$ supérieures à 30 mètres, la formule donne des épaisseurs trop fortes, il conviendra dans ce cas de se guider, dans sa première hypothèse, sur les constructions existantes (Art. 233).

Partant de l'épaisseur ainsi fixée, on détermine le joint de rupture comme il a été dit n° 626, et par suite la valeur de la poussée horizontale $P\frac{z}{y}$ de chaque voussoir agissant sur le voussoir résistant. Si cette poussée s'exerçait uniformément sur toute la hauteur $e$ du joint à la clef, il serait facile de calculer quelle devrait être la valeur de $e$ pour y résister ; mais remarquons que le voussoir agissant $ab$, figure 28, planche III, par sa tendance à tourner autour du point $a$, rend nulle la pression au point intérieur A, tandis qu'elle est maximum au point extérieur $a$. Il est évident que la voûte ne résistera qu'autant que cette pression maximum au point $a$ ne dépassera pas la limite $k$ que comporte la pierre de la voûte. La pression étant nulle en A, et $k$ en $a$, supposant que chaque point de $e$ résiste en raison inverse de sa distance au point $a$, il en résulte que la résistance moyenne est $\frac{k}{2}$, et la résitance totale, $\frac{ke}{2}$. Cette résistance totale peut être représentée par la surface d'un triangle dont la base est $k$ et la hauteur $e$ ; son point d'application est situé au centre de gravité du triangle, c'est-à-dire à une distance $\frac{e}{3}$ de la base ou du point $a$ (*Int.*, 1444), et comme le moment de cette résistance, pris par rapport au point de rotation $b$, doit être égal au moment du poids du voussoir agissant $ab$, pris par rapport à ce même point $b$, on doit donc avoir (*Int.*, 1411).

$$\frac{ke}{2}\left(y - \frac{e}{3}\right) = Pz.$$

Dans cette formule, les longueurs étant représentées en mètres et P en kilogrammes, $k$ exprime le nombre de kilogrammes que peut sup-

porter avec sécurité chaque mètre carré de la pierre qui compose la voûte (218).

La formule ainsi établie donnera la valeur de $e$, et si cette valeur était différente de celle que l'on a supposée pour déterminer le joint de rupture (626), on déterminerait de nouveau ce joint en adoptant cette seconde valeur de $e$, et la nouvelle valeur de $Pz$ fournirait pour $e$ une valeur plus approchée (629).

Dans un travail récent (brochure publiée au Mans), M. Léveillé, ingénieur en chef des ponts et chaussées, a reconnu que la formule de Rondelet était applicable à une voûte de pont d'une forme quelconque, $d$ désignant, dans tous les cas, l'ouverture ou la distance des pieds-droits ; seulement pour rendre les opérations plus faciles, M. Léveillé adopte

$$e = \frac{1 + 0{,}1d}{3}.$$

Ainsi cette formule, dans laquelle $d$ désigne toujours l'ouverture, est applicable aux voûtes en plein cintre, en anse de panier et en arc de cercle ; d'après des comparaisons faites à un grand nombre de ponts, il résulte qu'elle est même applicable aux voûtes qui portent des convois, et aussi à celles chargées d'une grande épaisseur de terre.

628. *Épaisseur des pieds-droits.* Lorsque les pieds-droits font culée, c'est-à-dire doivent résister à la poussée horizontale de la voûte, il peut arriver qu'ils se renversent en tournant autour de leur arête extérieure. Ce cas ne peut avoir lieu qu'autant que l'inégalité ($\alpha$) du n° 626 ne serait pas satisfaite, et alors on augmenterait l'épaisseur du pied-droit et par suite $z'$ de manière à y satisfaire. On opérerait d'une manière analogue pour le cas où le pied-droit pourrait tourner autour de son arête intérieure (3° 626).

Il peut arriver aussi que, par suite d'une trop faible épaisseur, le pied-droit glisse sur sa base. Ce glissement ne peut avoir lieu dès que l'inégalité du 2°, n° 626, est satisfaite.

Il peut arriver également que la voûte glisse sur ses naissances ; on vérifiera encore si cet effet est possible à l'aide de l'inégalité du 2° n° 626, dans laquelle M ne comprendra plus le poids du pied-droit, mais seulement celui de la moitié de voûte qui le surmonte. Ce cas est évidemment celui qui exige la plus grande épaisseur de pied-droit. Cependant, comme l'épaisseur statique calculée pour le renversement est ordinairement plus que suffisante pour résister au glissement, on ne peut s'en tenir à celle calculée d'après le glissement.

Ordinairement on augmente l'épaisseur statique trouvée d'une quantité telle, qu'en y supposant appliquée une pression égale aux 2/3 de la charge totale de la fondation, on n'ait à craindre ni le tassement du sol ni l'écrasement de la pierre. Dans le mémorial du génie militaire, au

lieu d'opérer ainsi pour obtenir de la stabilité, on multiplie l'épaisseur statique trouvée par un coefficient égal à 1,38 ou 1,40; on l'a même porté à 1,90, mais cette dernière valeur paraît exagérée.

Dans les anciens ponts, on faisait les arches très-petites et en plein cintre ou en anse de panier, et les piles faisaient culée; mais dans les arches actuelles, que l'on fait grandes et en arc de cercle afin de faciliter la navigation, le joint de rupture étant aux naissances pour un arc dont la montée est le 1/6 ou le 1/8 de l'ouverture, il en résulte que la poussée est trop considérable pour pouvoir établir des piles faisant culée; on se contente de leur donner des dimensions suffisantes pour que les pierres résistent avec sécurité à la charge qu'elles ont à supporter (218), en ayant égard aux effets des glaces et à toutes les autres causes de dégradation.

Dans son travail, M. Léveillé a donné les formules suivantes pour calculer l'épaisseur des pieds-droits ou culées.

Arc de cercle $$E = (0{,}33 + 0{,}212\,d)\sqrt{\frac{h}{H} \times \frac{d}{f+e}}$$

Plein cintre $$E = (0{,}60 + 0{,}162\,d)\sqrt{\frac{h+0{,}25\,d}{H} \times \frac{0{,}865\,d}{0{,}25\,d+e}}$$

Anse de panier $$E = (0{,}43 + 0{,}154d)\sqrt{\frac{h+0{,}54\,b}{H} \times \frac{0{,}84\,d}{0{,}465b+e}}.$$

E épaisseur des culées;
$d$ ouverture de la voûte;
$h$ hauteur des culées ou distance verticale entre les naissances et le dessus des fondations;
$e$ épaisseur de la voûte à la clef;
$f$ flèche;
$b$ pour les voûtes en anse de panier, la formule a été établie dans l'hypothèse que l'intrados est une ellipse ayant $d = 2a$ pour grand axe, et $b = f$ pour demi-petit axe (*Int.*, 1049);
H distance verticale entre le dessus de la chaussée et le dessus des fondations. On a habituellement $H = h + f + e + 0^m,60$, le terme $0^m,60$ représentant la charge et le pavage qui, d'ordinaire, recouvrent la voûte, et dont le poids, après tassement, peut être considéré comme sensiblement égal à celui de la maçonnerie.

Le numérateur des fractions ayant H pour dénominateur représente la hauteur du point où le joint de rupture rencontre l'intrados au-dessus des fondations. Dans les voûtes en arc de cercle, le joint de rupture étant en général au-dessus des naissances, on l'a supposé aux naissances. Dans les voûtes en plein cintre extradossées horizontalement, le joint de rupture faisant un angle de 60° avec la verticale, on doit prendre $h + 0{,}25d$ pour le numérateur de H; en ce point, le rapport de la flèche à la corde est de 0,288, valeur que le rapport de la flèche à la corde atteint rarement dans les voûtes en arc de cercle.

Pour les voûtes en anse de panier, le joint de rupture, normal à l'intrados, fait avec la verticale un angle de 45°; et si l'on suppose que l'intrados est une ellipse, il est rencontré par le joint de rupture à une hauteur $0{,}54b$ au-dessus des naissances; de sorte que le numérateur de H est $h + 0{,}54b$.

*TABLEAU de ponts auxquels M. Léveillé a appliqué ses formules.* Dans tous les calculs, l'épaisseur calculée de la clef a été substituée à l'épaisseur réelle, et l'on a pris $0^m.60$ pour la hauteur de surcharge.

| DÉSIGNATION. | OUVERTURE. | FLÈCHE. | $\frac{f}{d}$ | ÉPAISSEUR à la clef | | HAUTEUR des culées. | ÉPAISSEUR des culées | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | réelle. | calculée. | | réelle. | calculée. |
| *1° Ponts en arc de cercle.* | | | | | | | | |
| Pont sur le chemin des Fruitiers (chemin de fer du Nord) | m. 4.00 | m. 0.70 | 0.175 | m. 0.55 | m 0.47 | m. 4.00 | m. 1.80 | m. 1.81 |
| — de Paisia | 5.00 | 0.80 | 0.160 | 0.52 | 0.50 | 2.00 | 1.70 | 1.95 |
| — de Méry (chemin du Nord) | 7.63 | 0.90 | 0.118 | 0 65 | 0.59 | 4.31 | 3.56 | 3.61 |
| — de Melisey | 11.40 | 1 50 | 0.132 | 0.60 | 0.71 | 3.55 | 5.20 | 4.68 |
| — de Couturette, à Arbois | 13 00 | 1.86 | 0.143 | 0.90 | 0.77 | 2.00 | 5.20 | 4.23 |
| — sur le Salat | 14.00 | 1.90 | 0.136 | 1.10 | 0.80 | 6.21 | 5.80 | 6.06 |
| — de la rue des Abattoirs, à Paris (chemin de fer de Strasbourg) | 16.05 | 1.55 | 0.097 | 0.90 | 0.87 | 3.93 | 10,00 | 7.24 |
| — sur la Forth, à Stirling | 16.30 | 3.12 | 0.192 | 0.84 | 0.88 | 6.32 | 4.88 | 5.15 |
| — Saint-Maxence, sur l'Oise | 23.40 | 1.95 | 0.083 | 1.46 | 1.11 | 8.45 | 11.80 | 12.17 |
| — du chemin de fer du Nord, sur l'Oise | 25.10 | 3.57 | 0.141 | 1.40 | 1.17 | 5.43 | 9.60 | 9.32 |
| — de Dorlaston | 26.37 | 4.11 | 0.156 | 1.07 | 1.21 | 5.03 | 9.76 | 9.00 |
| *2° Ponts en plein cintre.* | | | | | | | | |
| Aqueduc près d'Enghien (chemin de fer du Nord) | 0.60 | » | » | 0.35 | 0.35 | 0.90 | 0.50 | 1.50 |
| Pont de Paty | 2.00 | » | » | 0.35 | 0.40 | 2.40 | 1.20 | 1.03 |
| — sur le Thou | 2.00 | » | » | 0.50 | 0.40 | 1.95 | 1.00 | 1.01 |
| — des Mévoisins, de Paris à Chartres | 3.00 | » | » | 0.40 | 0.43 | 3.60 | 1.40 | 1.31 |
| — du Crochet (chemin de fer de Paris à Chartres) | 4.00 | » | » | 0.50 | 0.47 | 4.00 | 1.50 | 1.61 |
| — de Long-Sauts, *id.* | 5.00 | » | » | 0.55 | 0.50 | 3.00 | 1 80 | 1.78 |
| — d'Enghien (chemin de fer du Nord.) | 7.40 | » | » | 0.60 | 0.58 | 2.00 | 2.10 | 2.18 |
| — de Pantin (canal Saint-Martin) | 8.20 | » | » | 0.75 | 0.61 | 3.60 | 3.20 | 2.91 |
| — de la Bastille, *id.* | 11.00 | » | » | 1.20 | 0.70 | 6 30 | 3.00 | 3 25 |
| — des Basses-Granges (Orléans à Tours) | 15.00 | » | » | 1.20 | 0.83 | 2.00 | 3.80 | 3.88 |
| — d'Eymoutiers | 20.00 | » | » | ? | 1.00 | 1.00 | 4.50 | 4.49 |
| *3° Ponts en anse de panier.* | | | | | | | | |
| Pont de Charolles | 6.00 | 2.30 | 0.383 | 0.60 | 0.54 | 0.40 | 1.60 | 1.60 |
| — du canal Saint-Denis | 12.00 | 4.50 | 0.375 | 0.90 | 0.73 | 3.10 | 3.75 | 3.40 |
| — de Château-Thierry | 15.59 | 5.20 | 0.334 | 1.14 | 0.85 | 4.14 | 4.55 | 4.22 |
| — de Dôle sur le Doubs | 15.92 | 5.31 | 0.335 | 1.14 | 0.86 | 0 41 | 3.60 | 3.90 |
| — de Welesley, à Limerich | 21.34 | 5.33 | 0.25 | 0.61 | 1.04 | 3.66 | 5.03 | 6.47 |
| — d'Orléans (chemin de fer de Vierzon) | 24.20 | 7.97 | 0.328 | 1.20 | 1.14 | 0.87 | 5.62 | 5.33 |
| — de Trilport | 24 50 | 8.44 | 0.344 | 1.36 | 1.15 | 1.95 | 5.85 | 6.21 |
| — de Mantes | 35.10 | 10.49 | 0.313 | 1.95 | 1.50 | 0.98 | 8 77 | 8.65 |
| — de Neuilly | 38.98 | 9.74 | 0.25 | 1.62 | 1.62 | 2,30 | 10.80 | 10.80 |

De même que pour la clef (627), l'épaisseur des culées n'a pas besoin d'être augmentée pour la limite des hauteurs ordinaires de grands remblais, et même les culées tendent plutôt à se verser à l'intérieur de la voûte que vers les terres quand elles ont une très-grande hauteur; c'est ce qui motive les voûtes superposées que l'on établit dans les culées pour entretoiser les murs, suppléer à leur défaut d'épaisseur et les empêcher de boucler.

Le tableau suivant ne contient que des voûtes en plein cintre, les autres pouvant toujours être évitées et ayant le désavantage de nécessiter des culées plus fortes.

| DÉSIGNATION DES PONTS. | OUVERTURE | ÉPAISSEUR à la clef | | HAUTEUR des culées. | ÉPAISSEUR des culées | | SURCHARGE sur l'extrados. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | réelle. | calculée. | | réelle. | calculée. | |
| | m. | m. | m. | m. | m. | m. | m. |
| Pont du rempart (Orléans à Tours). | 1.20 | 0.45 | 0.37 | 1.20 | 0.55 | 0.74 | 1.70 |
| — de Saint-Hilarion (Paris à Chartres). | 2.00 | 0.40 | 0.40 | 3.80 | 1.20 | 1.09 | 4.10 |
| — du Tertre (Paris à Chartres). | 3.00 | 0.45 | 0.43 | 2.50 | 1.40 | 1.30 | 6.20 |
| — de la Tuilerie, *id.* | 4.00 | 0.50 | 0.47 | 3.40 | 1.40 | 1.58 | 4.10 |
| — des Voisins. | 5.00 | 0.55 | 0.50 | 2.50 | 1.50 | 1.73 | 5.15 |
| — des Basses-Granges (Orléans à Tours. | 15.00 | 1.20 | 0.83 | 2.00 | 3.80 | 3.88 | 1.30 |

**629.** *Méthode graphique* donnée par M. Méry, ingénieur des ponts et chaussées, *pour calculer la stabilité des voûtes.*

Par ce procédé très-pratique, on peut obtenir les divers éléments principaux nécessaires pour déterminer les épaisseurs des voûtes cylindriques de toutes les formes et de leurs pieds-droits.

Lorsqu'une voûte est en équilibre, de quelque manière que, sur chaque joint, la pression se répartisse entre les différents points, l'ensemble des pressions partielles donne une résultante unique appliquée en un point du joint; ainsi, par exemple, pour le joint $ab$, figure 30, planche III, cette résultante, que nous désignerons par $p$, sera appliquée au point $g$, et la voûte devra être tenue en équilibre par cette pression $p$ et par la poussée horizontale P qui agit au sommet de la voûte. Sur chacun des autres joints $a'b'$, $a''b''$, etc., il existe des points $g'$, $g''$, etc., analogues à $g$. Tous ces points déterminent une courbe, que M. Méry appelle *courbe des pressions*, qui est très-propre à éclairer sur l'équilibre de la voûte.

Si cette courbe passe au sommet C de la voûte, au point $b$ de l'intrados et au point extérieur A, cela indique que la voûte tend à s'ouvrir à l'intrados au joint C, à l'extrados au joint $ab$, et que le pied-droit tend à tourner autour de l'arête extérieure A.

La courbe des pressions n'atteignant pas les points C, $b$ et A, mais s'en rapprochant comme l'indique la figure, elle montre encore que ces points sont les plus faibles de la voûte.

La résultante de toutes les pressions qui s'exercent sur le joint $ab$ passant par le point $g$ où la courbe des pressions rencontre ce joint, la moitié des composantes de $p$ agissent sur la portion $bg$, qui doit y résister sans s'écraser; il en est de même de chacune des portions $e$A, $b'g'$, $b''g''$, C$g'''$.

Nous disons que $bg$ doit être capable de supporter la moitié de la pression qui s'exerce sur le joint $ba$; mais remarquons que la pression allant en augmentant depuis le point $g$ jusqu'en $b$, l'arête $b$ s'écraserait si l'on s'en tenait pour $bg$ à la limite exigée par une demi-pression répartie uniformément.

On n'a rien de bien positif sur la manière dont la pression se répartit sur un joint, mais on admet généralement qu'étant à son maximum en $b$, elle décroît proportionnellement à la distance de ce point; de sorte que la pression étant moyenne en $g$, elle est nulle au point $h$ qui donne $hg = 2gb$ (la pression totale étant représentée par la surface d'un triangle dont $hb$ est la hauteur, $g$ le centre de gravité, et dont la base, que nous représenterons par k, est proportionnelle à la pression maximum en $b$ (627); en tout autre point, la pression est représentée par la parallèle menée en ce point à la base du triangle).

Cela posé, comme il est évident qu'au point $b$ la pression $k$ ne doit pas dépasser la limite que comporte la pierre, il en résulte que la partie $bg$ doit être capable de supporter une charge représentée par $k \times bg$, et comme la pression totale sur le joint $ab$ est $k \times \frac{3}{2} bg$, l'on voit que $bg$ doit être capable de supporter les 2/3 de la charge totale du joint, et non la moitié.

La pression s'exerçant suivant la tangente à la courbe des pressions, cette courbe, par son inclinaison sur les divers joints, sert encore à faire connaître les joints où le glissement est à craindre. $\alpha$ étant l'angle que fait la direction de la pression avec le joint du voussoir, l'effort qui agit suivant la direction du joint pour produire le glissement est $p \cos \alpha$, l'effort normal au joint est $p \sin \alpha$, et 0,76 étant le coefficient de frottement ordinairement adopté, on doit avoir, pour qu'il y ait stabilité, $p \cos \alpha < p \sin \alpha \times 0{,}76$, ou $\cos \alpha < \sin \alpha \times 0{,}76$ (nos 61, 62 et 75).

**630.** *Tracé de la courbe des pressions.* Une voûte exigeant, pour sa stabilité, que son épaisseur et celle de ses pieds-droits soient plus considérables que ne l'exige l'équilibre statique, on conçoit que la courbe des pressions peut y prendre une infinité de positions différentes sans qu'il soit possible de préciser celle qui se réalisera, cette position dépendant du tassement, que l'on ne peut prévoir exactement, et des surcharges accidentelles auxquelles la voûte peut être soumise.

Prenons, fig. 31, pl. III, sur le plan des naissances le point *m* paraissant, par ses distances aux points *b* et *a*, devoir appartenir à la courbe des pressions (les parties *bm* et *am* doivent chacune pouvoir supporter sans s'écraser les 2/3 de la charge du joint *ab*) (629) ; prenons également sur le joint vertical *cd* le point *n* paraissant, par sa distance au point *c*, appartenir à la courbe des pressions, et proposons-nous de tracer cette courbe passant par *m* et *n*, c'est-à-dire de trouver les points en lesquels elle rencontre les joints *ef*, *hi*, etc.

On calcule le poids du voussoir *cdba*, et on détermine la position de son centre de gravité; soit KG la verticale passant par ce centre de gravité ; prolongeons cette verticale jusqu'à l'horizontale *n*X, joignons K*m*, prenons KS proportionnel au poids trouvé, et terminant le parallélogramme KSRP, KP est proportionnel à la poussée horizontale, et la diagonale KR à la pression totale *p* sur le joint *ab*. Cela fait, soit *kg* la verticale passant par le centre de gravité du voussoir *cdfe* ; prenons *ks* proportionnel au poids de ce voussoir, et *kp* égal à la poussée horizontale KP; construisons le parallélogramme *ksrp* ; la diagonale *kr* représente l'intensité et la direction de la pression sur le joint *ef*, et le point *s*, où elle rencontre ce joint, est un des points de la courbe des pressions. Opérant sur le voussoir *cdih* comme sur *cdfe*, on détermine le point *q* où la courbe rencontre le joint *hi*, et par la même marche on déterminerait tous les autres points de cette courbe.

Si les points *m* et *n* ont été mal choisis, on ne tarde pas à s'en apercevoir ; la courbe que l'on obtient sort des limites convenables ou conduit à une épaisseur démesurée de pieds-droits; on fait alors une nouvelle hypothèse sur la position de ces points, et on construit une nouvelle courbe, en se servant évidemment des poids et des positions des centres de gravité des voussoirs qui ont été déterminés pour la première courbe.

Supposant que la voûte est construite en matériaux assez résistants pour que la pression puisse s'exercer sur les arêtes des voussoirs sans les écraser, il est évident qu'il y aura équilibre tant que la courbe des pressions ne dépassera en aucun point la limite des voussoirs; mais qu'aussitôt cette limite dépassée, l'équilibre sera rompu si la voûte n'est pas consolidée par des armatures ou des mortiers d'une résistance supérieure à l'effort qui tend à rompre l'équilibre. Avec les matériaux ordinairement employés, les distances de la courbe aux extrémités de chaque joint doivent être telles, que chacune d'elles soit capable de supporter une charge uniformément répartie égale aux 2/3 de la charge totale qui repose sur le joint. Lorsque deux voûtes opposées s'appuient sur un même pied-droit, on peut s'en tenir à l'épaisseur statique, c'est-à-dire à celle où la courbe des pressions passe aux extrémités des joints de la clef, des reins et du plan des naissances; parce que, outre que les poussées contraires rendent tout mouvement du pied-droit im-

possible, la maçonnerie qui relie les deux voûtes au-dessus du plan des naissances rend impossible le glissement et le renversement de la partie de voûte comprise entre les naissances et les reins. Il est évident que le massif de maçonnerie qui reliera les deux voûtes doit être construit au moins jusqu'aux joints de rupture des voûtes, avant le décintrement et le chargement.

**631.** M. Petit, capitaine du génie, a donné les tableaux suivants des valeurs des angles de rupture, c'est-à-dire des angles que forment avec la verticale les rayons menés du centre de la voûte aux joints de rupture (Extrait du n° 12 du *Mémorial de l'officier du génie*).

1° *Table des angles de rupture, des poussées et des épaisseurs limites des pieds-droits des voûtes en plein cintre à extrados parallèle, sans aucune maçonnerie ni surcharge sur la voûte.*

| VALEUR du rapport $\frac{R}{r}$ | RAPPORT du diamètre à l'épaisseur. | VALEUR de l'angle de rupture. | RAPPORT C de la poussée au carré du rayon $r$ de l'intrados. | | RAPPORT $\sqrt{2C}$ de l'épaisseur-limite du pied-droit au rayon de l'intrados, *stabilité de Lahire.* |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Cas de la rotation. | Cas du glissement. | |
| 2.732 | 1.154 | 0° 00′ | 0.000 00 | 0.989 23 | |
| 2.70 | 1.176 | 13 42 | 0.002 14 | 0.962 62 | |
| 2.65 | 1.212 | 22 00 | 0.003 19 | 0.921 68 | |
| 2.60 | 1.250 | 27 30 | 0.008 09 | 0.881 51 | |
| 2.50 | 1.333 | 35 52 | 0.022 83 | 0.803 46 | |
| 2.40 | 1.428 | 42 6 | 0.041 09 | 0.728 47 | |
| 2.30 | 1.538 | 46 47 | 0.068 35 | 0.656 54 | |
| 2.20 | 1.666 | 51 4 | 0.086 48 | 0.587 67 | |
| 2.10 | 1.810 | 54 27 | 0.109 26 | 0.521 86 | |
| 2.00 | 2.000 | 57 17 | 0.130 17 | 0.459 12 | 1.3223 |
| 1.90 | 2.282 | 59 37 | 0.148 13 | 0.399 43 | 1.2320 |
| 1.80 | 2.500 | 61 24 | 0.163 73 | 0.342 81 | 1.1414 |
| 1.70 | 2.857 | 62 53 | 0.171 80 | 0.289 24 | 1.0484 |
| 1.60 | 3.333 | 63 49 | 0.175 17 | 0.238 74 | 0.9525 |
| 1.59 | 3.389 | 63 52 | 0.175 33 | 0.233 86 | 0.9427 |
| 1.58 | 3.448 | 63 55 | 0.175 35 | 0.229 01 | 0.9329 |
| 1.57 | 3.508 | 63 58 | 0.175 24 | 0.224 34 | 0.9233 |
| 1.56 | 3.571 | 64 1 | 0.174 99 | 0.219 40 | 0.9134 |
| 1.55 | 3.636 | 64 3 | 0.174 78 | 0.214 64 | 0.9031 |
| 1.54 | 3.703 | 64 5 | 0.174 45 | 0.209 91 | 0.8931 |
| 1.53 | 3.773 | 64 7 | 0.173 97 | 0.205 21 | 0.8834 |
| 1.52 | 3.846 | 64 8 | 0.173 52 | 0.200 54 | 0.8730 |
| 1.51 | 3.920 | 64 8 | 0.173 10 | 0.195 90 | 0.8628 |
| 1.50 | 4.000 | 64 9 | 0.172 54 | 0.191 30 | 0.8527 |
| 1.49 | 4.081 | 64 8 | 0.171 80 | 0.186 73 | 0.8424 |
| 1.48 | 4.166 | 64 8 | 0.170 95 | 0.182 18 | 0.8320 |
| 1.47 | 4.255 | 64 7 | 0.170 08 | 0.177 66 | 0.8216 |
| 1.46 | 4.347 | 64 6 | 0.169 15 | 0.173 18 | 0.8112 |
| 1.45 | 4.444 | 64 5 | 0.167 98 | 0.168 72 | 0.8007 |
| 1.44 | 4.545 | 64 3 | 0.166 83 | 0.164 30 | 0.7962 |
| 1.43 | 4.651 | 64 0 | 0.165 68 | 0.159 91 | 0.7934 |

| VALEUR du rapport $\frac{R}{r}$ | RAPPORT du diamètre à l'épaisseur. | VALEUR de l'angle de rupture. | RAPPORT C de la poussée au carré du rayon $r$ de l'intrados. | | RAPPORT $\sqrt{2C}$ de l'épaisseur-limite du pied droit au rayon de l'intrados, *stabilité de Lahire.* |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Cas de la rotation. | Cas du glissement | |
| 1.42 | 4.761 | 63° 56′ | 0.16448 | 0.15555 | 0.7906 |
| 1.41 | 4.878 | 63 52 | 0.16317 | 0.15122 | 0.7874 |
| 1.40 | 5.000 | 63 48 | 0.16167 | 0.14691 | 0.7838 |
| 1.39 | 5.128 | 63 43 | 0.16014 | 0.14264 | 0.7801 |
| 1.38 | 5.263 | 63 38 | 0.15845 | 0.13841 | 0.7760 |
| 1.37 | 5.406 | 63 32 | 0.15672 | 0.13420 | 0.7717 |
| 1.36 | 5.555 | 63 26 | 0.15482 | 0.13002 | 0.7670 |
| 1.35 | 5.714 | 63 19 | 0.15287 | 0.12587 | 0.7622 |
| 1.34 | 5.882 | 63 10 | 0.15096 | 0.12176 | 0.7574 |
| 1.33 | 6.060 | 63 00 | 0.14896 | 0.11767 | 0.7524 |
| 1.32 | 6.264 | 62 50 | 0.14678 | 0.11362 | 0.7468 |
| 1.31 | 6.451 | 62 33 | 0.14510 | 0.10959 | 0.7425 |
| 1.30 | 6.666 | 62 14 | 0.14330 | 0.10559 | 0.7379 |
| 1.29 | 6.896 | 62 9 | 0.14013 | 0.10163 | 0.7297 |
| 1.28 | 7.142 | 62 3 | 0.13691 | 0.09770 | 0.7243 |
| 1.27 | 7.407 | 61 47 | 0.13430 | 0.09379 | 0.7144 |
| 1.26 | 7.692 | 61 30 | 0.13157 | 0.08992 | 0.7071 |
| 1.25 | 8.000 | 61 15 | 0.12847 | 0.08608 | 0.6987 |
| 1.24 | 8.333 | 61 1 | 0.12516 | 0.08227 | 0.6896 |
| 1.23 | 8.695 | 60 40 | 0.12201 | 0.07849 | 0.6809 |
| 1.22 | 9.090 | 60 19 | 0.11887 | 0.07474 | 0.6721 |
| 1.21 | 9.523 | 60 00 | 0.11546 | 0.07102 | 0.6615 |
| 1.20 | 10.000 | 59 41 | 0.11140 | 0.06733 | 0.6504 |
| 1.19 | 10.526 | 59 10 | 0.10791 | 0.06368 | 0 6404 |
| 1.18 | 11.111 | 58 40 | 0.10447 | 0.06005 | 0.6292 |
| 1.17 | 11.764 | 58 9 | 0.10021 | 0.05646 | 0.6171 |
| 1.16 | 12.500 | 57 40 | 0.09593 | 0.05289 | 0.6038 |
| 1.15 | 13.333 | 57 1 | 0.09176 | 0.04935 | 0.5905 |
| 1.14 | 14.285 | 56 23 | 0.08729 | 0.04585 | 0.5759 |
| 1.13 | 15.384 | 55 45 | 0.08254 | 0.04237 | 0.5601 |
| 1.12 | 16.666 | 54 48 | 0.07789 | 0.03984 | 0.5444 |
| 1.11 | 18.181 | 54 10 | 0.07273 | 0.03552 | 0.5259 |
| 1.10 | 20.000 | 53 15 | 0.06754 | 0.03243 | 0.5066 |
| 1.09 | 22.222 | 52 14 | 0.06177 | 0.02879 | |
| 1.08 | 25.000 | 51 7 | 0.05649 | 0.02546 | |
| 1.07 | 28.571 | 49 48 | 0.05065 | 0.02217 | |
| 1.06 | 33.333 | 48 18 | 0.04455 | 0.01891 | |
| 1.05 | 40.000 | 46 32 | 0.03813 | 0.01568 | |
| 1.04 | 50.000 | 44 4 | 0.03139 | 0.01249 | |
| 1.03 | 66.666 | 41 4 | 0.02459 | 0.00932 | |
| 1.02 | 100.000 | 38 12 | 0 01691 | 0.00618 | |
| 1.01 | 200.000 | 32 36 | 0.00889 | 0.00308 | |
| 1.00 | Infini. | 0 00 | 0.00009 | 0.00000 | |

*Observations sur la table précédente, et usage de cette table.*

R rayon de l'extrados ;

$r$ rayon de l'intrados ;

C rapport de la poussée horizontale maximum agissant à la clef au carré du rayon $r$.

Pour obtenir la valeur de la poussée horizontale en kilogrammes, par mètre courant

de longueur de voûte, il suffit de multiplier le produit $Cr^2$ par le poids d'un mètre cube de maçonnerie, qui est ordinairement de 2250 kilogrammes pour le moellon.

L'auteur de cette table remarque que la rupture des voûtes en plein cintre à extrados parallèle n'a lieu que par rotation à l'intérieur autour d'un joint des reins, ou par glissement à l'intérieur sur un des joints.

Les valeurs du rapport C sont calculées, dans les cas de glissement, en supposant le coefficient du frottement égal à 0,577; c'est la valeur donnée par Rondelet pour les parallélipipèdes en pierre de liais, équarris et dressés au grès, glissant sur un plan de même pierre et dressé de même. De ses expériences, Boistard conclut qu'il faut faire ce coefficient égal à 0.76 pour la maçonnerie.

L'examen des valeurs de C fait voir que dès que le rapport $\frac{R}{r}$ descend à 1,44, la poussée horizontale devient plus faible pour produire le glissement que pour produire la rotation; par conséquent, pour les voûtes donnant $\frac{R}{r}$ supérieur à 1.44, on adoptera les valeurs de C dues au glissement, et pour celles dont les valeurs de $\frac{R}{r}$ sont de 1.44 et au-dessous, on adoptera les valeurs de C dues à la rotation. Un interligne horizontal placé dans les colonnes de la table indique la limite où l'une des valeurs de C commence à surpasser l'autre.

L'épaisseur limite du pied-droit dont il est question dans la 6e colonne de la table est l'épaisseur qu'il faudrait adopter si la hauteur du pied-droit était infinie. Dans les cas ordinaires de la pratique, quand on n'a pas besoin d'une très-grande stabilité, on peut réduire cette épaisseur-limite de 1/10 environ.

Soit à déterminer, par exemple, l'épaisseur-limite à donner aux pieds-droits d'une voûte à extrados parallèle, de 5 mètres de diamètre, en faisant usage de la table précédente.

On commence par déterminer l'épaisseur de la voûte d'après la formule de Perronnet, ce qui donne

$$e = 0.0347d + 0.325 = 0.0347 \times 5 + 0.325 = 0^m.498. \qquad (627)$$

On a donc $r = 2^m.50$, $R = 2^m.998$, et par suite,

$$\frac{R}{r} = 1.20.$$

Ce rapport étant moindre que 1.44, la poussée par rotation est supérieure à celle par glissement, et on doit prendre

$$C = 0.11140.$$

La poussée par mètre courant est alors

$$0.11140 \times r^2 \times 2250 = 0.11140 \times 2.50 \times 2.50 \times 2250 = 1566 \text{ kilog.}$$

L'épaisseur-limite des pieds-droits est, en adoptant la stabilité de Lahire,

$$\sqrt{2C} \times r = 0.6504 \times 2.50 = 1^m.626.$$

Si les pieds-droits, au lieu d'être supposés avoir une hauteur infinie, n'avaient que 3 mètres de hauteur, on pourrait, d'après une application d'une formule de M. Petit, faite par M. Morin, réduire l'épaisseur $1^m.626$ à $1^m.457$.

2° *Table des angles de rupture, des poussées et des épaisseurs-limites des pieds-droits des voûtes en plein cintre extradossées en chape à 45°. Ce sont des voûtes en plein cintre extradossées parallèlement, mais couvertes d'une chape en maçonnerie, dont le plan supérieur est incliné à 45° à l'horizon et tangent à l'extrados de la voûte.*

| VALEUR du rapport $\frac{R}{r}$ | RAPPORT du diamètre à l'épaisseur. | VALEUR de l'angle de rupture. | RAPPORT C de la poussée au carré du rayon r de l'intrados. | | RAPPORT $\sqrt{2C}$ de l'épaisseur-limite du pied-droit au rayon de l'intrados, *stabilité de Vauban.* |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Cas de la rotation. | Cas du glissement. | |
| 2.00 | 2.000 | 60° | 0.264 24 | 0.74361 | 1.7246 |
| 1.90 | 2.222 | 60 | 0.284 16 | 0.656 48 | 1.6204 |
| 1.80 | 2.500 | 60 | 0.299 07 | 0.573 83 | 1.5147 |
| 1.70 | 2.857 | 60 | 0.308 67 | 0.495 64 | 1.4084 |
| 1.60 | 3.333 | 60 | 0.312 45 | 0.421 91 | 1.2990 |
| 1.59 | 3.389 | 60 | 0.312 49 | 0.414 78 | 1.2880 |
| 1.58 | 3.448 | 60 | 0.312 57 | 0 408 41 | 1.2781 |
| 1.57 | 3.508 | 61 | 0 312 64 | 0.400 67 | 1.2660 |
| 1.56 | 3.571 | 61 | 0.312 46 | 0.393 67 | 1.2548 |
| 1.55 | 3.636 | 61 | 0.312 22 | 0 386 73 | 1.2437 |
| 1.54 | 3.703 | 61 | 0.311 91 | 0.379 83 | 1.2318 |
| 1.53 | 3.773 | 61 | 0.311 53 | 0.372 97 | 1.2214 |
| 1.52 | 3.846 | 61 | 0.311 08 | 0.366 15 | 1.2102 |
| 1.51 | 3.920 | 61 | 0.310 56 | 0.359 38 | 1.1989 |
| 1.50 | 4.000 | 61 | 0.309 96 | 0.352 66 | 1.1877 |
| 1.49 | 4.081 | 61 | 0.309 28 | 0.345 98 | 1.1764 |
| 1.48 | 4.166 | 61 | 0.308 55 | 0.339 34 | 1.1650 |
| 1.47 | 4.255 | 61 | 0.307 72 | 0 332 75 | 1.1537 |
| 1.46 | 4.347 | 60 | 0.306 85 | 0.326 21 | 1.1422 |
| 1.45 | 4 444 | 60 | 0.305 87 | 0.319 71 | 1.1308 |
| 1.44 | 4.545 | 60 | 0.304 85 | 0.313 25 | 1.1193 |
| 1.43 | 4.651 | 60 | 0.304 08 | 0.306 84 | 1.1078 |
| 1.42 | 4.761 | 60 | 0.302 96 | 0.300 47 | 1.1008 |
| 1.41 | 4.878 | 60 | 0.301 73 | | 1 0986 |
| 1.40 | 5.000 | 59 | 0.300 01 | 0.287 87 | 1.0954 |
| 1.39 | 5.128 | 59 | 0.297 12 | | 1.0914 |
| 1.38 | 5.263 | 59 | 0.297 06 | | 1.0893 |
| 1.37 | 5.406 | 59 | 0.295 50 | | 1.0872 |
| 1.36 | 5.555 | 59 | 0.293 86 | | 1.0844 |
| 1.35 | 5.714 | 58 | 0.292 85 | | 1.0823 |
| 1.34 | 5.882 | 58 | 0.290 37 | | 1.0777 |
| 1.33 | 6.060 | 58 | 0.288 50 | | 1.0742 |
| 1.32 | 6.264 | 58 | 0.286 54 | | 1.0705 |
| 1 31 | 6.451 | 57 | 0.284 56 | | 1.0668 |
| 1.30 | 6.666 | 57 | 0.282 31 | 0.227 56 | 1.0626 |
| 1.29 | 6.896 | 57 | 0 280 27 | | 1.0588 |
| 1.28 | 7.142 | 56 | 0.278 10 | | 1.0547 |
| 1.27 | 7.407 | 56 | 0.275 78 | | 1.0503 |
| 1.26 | 7.692 | 55 | 0.273 43 | | 1.0458 |
| 1.25 | 8.000 | 54 | 0 271 02 | | 1.0412 |
| 1.24 | 8 333 | 53 | 0.268 50 | | 1.0363 |
| 1.23 | 8.695 | 53 | 0.266 08 | | 1.0316 |
| 1.22 | 9.090 | 52 | 0.263 77 | | 1 0272 |
| 1.21 | 9.523 | 51 | 0.260 74 | | 1.0217 |

| VALEUR du rapport $\frac{R}{r}$ | RAPPORT du diamètre à l'épaisseur. | VALEUR de l'angle de rupture. | RAPPORT C de la poussée au carré du rayon $r$ de l'intrados. | | RAPPORT $\sqrt{2C}$ de l'épaisseur-limite du pied-droit au rayon de l'intrados, *stabilité de Vauban.* |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Cas de la rotation. | Cas du glissement. | |
| 1.20 | 10 000 | 50° | 0.25806 | 0.17171 | 1.0160 |
| 1.19 | 10.526 | 50 | 0 25546 | | 1.0109 |
| 1.18 | 11.111 | 49 | 0.25277 | | 1.0045 |
| 1.17 | 11.764 | 49 | 0.25010 | | 1.0002 |
| 1.16 | 12.500 | 48 | 0.24742 | | 0.9948 |
| 1.15 | 13.333 | 47 | 0.24477 | | 0.9894 |
| 1.14 | 14 285 | 46 | 0.24218 | | 0.9842 |
| 1.13 | 15.384 | 44 | 0.23967 | | 0.9791 |
| 1.12 | 16.666 | 43 | 0.23732 | | 0.9743 |
| 1.11 | 18.181 | 43 | 0.23502 | | 0.9695 |
| 1.10 | 20.000 | 42 | 0.23292 | 0.12032 | 0.9652 |
| 1.05 | 40.000 | 36 | 0.22902 | | 0.9571 |

Les observations de la table 1° s'appliquent également à celle-ci, et pour déterminer l'épaisseur-limite des pieds-droits, on suit aussi la même marche; ainsi, on commence par déterminer l'épaisseur de la voûte extradossée parallèlement, à l'aide de la formule de Perronnet; on a alors $\frac{R}{r}$, et le tableau donne la valeur de C qui correspond à ce rapport; puis de cette valeur de C on conclut la poussée horizontale, ainsi que l'épaisseur-limite des pieds-droits. En opérant de cette manière, on trouverait, pour une voûte de 8 mètres de diamètre à l'intrados,

$$e = 0^{m}.6026, \quad \frac{R}{r} = 1.15, \quad C = 0.24477.$$

La poussée horizontale par mètre courant est $0.24477 \times r^2 \times 2250 = 8811$ kilog., et l'épaisseur-limite des pieds-droits est, en adoptant la stabilité de Vauban, $\sqrt{2C} \times r = 0{,}9894 \times r = 3^{m},9576$. Si les pieds-droits avaient 5 mètres de hauteur, on pourrait prendre pour leur épaisseur $3^{m},676$.

3° *Table des angles de rupture, des poussées et des épaisseurs-limites des pieds-droits des voûtes en plein cintre extradossées horizontalement. Ce sont des voûtes en plein cintre extradossées parallèlement, et couvertes d'un massif de maçonnerie dont le plan supérieur est horizontal et tangent à l'extrados de la voûte.*

| VALEUR du rapport $\frac{R}{r}$ | RAPPORT du diamètre à l'épaisseur. | VALEUR de l'angle de rupture. | RAPPORT C de la poussée au carré du rayon r de l'intrados. | | RAPPORT $\sqrt{2C}$ de l'épaisseur-limite du pied-droit au rayon de l'intrados, *stabilité de Lahire.* |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Cas de la rotation. | Cas du glissement. | |
| 2.00 | 2.000 | 36° | 0.05486 | 0.50358 | 1.3834 |
| 1.90 | 2.222 | 39 | 0.07101 | 0.43966 | 1.2925 |
| 1.80 | 2.500 | 44 | 0 08850 | 0.37901 | 1.2001 |
| 1.70 | 2.857 | 48 | 0.10631 | 0.32164 | 1.1055 |
| 1.60 | 3.333 | 52 | 0.12300 | 0.26755 | 1.0082 |
| 1.59 | 3.389 | 52 | 0.12453 | 0 26232 | 0.9984 |
| 1.58 | 3.448 | 53 | 0.12602 | 0.25712 | 0.9885 |
| 1.57 | 3.508 | 53 | 0.12747 | 0.25196 | 0.9784 |
| 1.56 | 3.571 | 54 | 0.12837 | 0.24683 | 0.9684 |
| 1.55 | 3.636 | 54 | 0.13027 | 0.24173 | 0.9584 |
| 1.54 | 3.703 | 55 | 0.13153 | 0.23667 | 0.9483 |
| 1.53 | 3.773 | 55 | 0.13289 | 0.23163 | 0.9381 |
| 1.52 | 3.846 | 55 | 0.13414 | 0.22664 | 0.9280 |
| 1.51 | 3.920 | 55 | 0.13531 | 0 22167 | 0.9177 |
| 1.50 | 4 000 | 56 | 0.13648 | 0 21673 | 0.9075 |
| 1.49 | 4.081 | 56 | 0.13756 | 0.21183 | 0.8972 |
| 1.48 | 4.166 | 56 | 0.13856 | 0 20696 | 0.8868 |
| 1.47 | 4.255 | 57 | 0.13952 | 0 20213 | 0.8764 |
| 1.46 | 4.347 | 57 | 0.14041 | 0.19733 | 0.8659 |
| 1.45 | 4 444 | 57 | 0.14122 | 0.19256 | 0 8554 |
| 1.44 | 4 545 | 58 | 0.14195 | 0.18782 | 0.8448 |
| 1.43 | 4.651 | 58 | 0.14268 | 0.18312 | 0.8341 |
| 1.42 | 4.761 | 58 | 0.14341 | 0.17845 | 0.8234 |
| 1.41 | 4.878 | 59 | 0.14376 | 0.17381 | 0.8126 |
| 1.40 | 5.000 | 59 | 0.14421 | 0.16920 | 0.8018 |
| 1.39 | 5 128 | 59 | 0.14456 | 0.16463 | 0.7909 |
| 1.38 | 5.263 | 59 | 0.14484 | 0.16009 | 0 7799 |
| 1.37 | 5.406 | 60 | 0.14498 | 0.15558 | 0.7689 |
| 1.36 | 5.555 | 60 | 0.14506 | 0.15111 | 0.7577 |
| 1.35 | 5.714 | 60 | 0.14504 | 0.14666 | 0.7465 |
| 1.34 | 5 882 | 60 | 0.14491 | 0.14225 | 0 7420 |
| 1.33 | 6.060 | 61 | 0.14467 | | 0.7414 |
| 1.32 | 6.264 | 61 | 0.14460 | | 0.7412 |
| 1.31 | 6 451 | 61 | 0.14390 | | 0.7394 |
| 1.30 | 6.666 | 61 | 0.14332 | 0.12495 | 0 7379 |
| 1.29 | 6.896 | 61 | 0.14264 | | 0.7362 |
| 1.28 | 7.142 | 62 | 0.14186 | | 0.7342 |
| 1.27 | 7.407 | 62 | 0.14101 | | 0.7320 |
| 1.26 | 7.692 | 62 | 0.13988 | | 0.7290 |
| 1.25 | 8.000 | 62 | 0.13872 | 0.10405 | 0.7260 |
| 1.24 | 8.333 | 62 | 0.13737 | | 0.7225 |
| 1.23 | 8.695 | 63 | 0.13593 | | 0.7187 |
| 1.22 | 9.090 | 63 | 0.13437 | | 0.7145 |
| 1.21 | 9.523 | 63 | 0.13263 | | 0.7099 |

| VALEUR du rapport $\frac{R}{r}$ | RAPPORT du diamètre à l'épaisseur. | VALEUR de l'angle de rupture. | RAPPORT C de la poussée au carré du rayon r de l'intrados. | | RAPPORT $\sqrt{2C}$ de l'épaisseur-limite du pied-droit au rayon de l'intrados, *stabilité de Lahire.* |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | Cas de la rotation. | Cas du glissement. | |
| 1.20 | 10.000 | 63° | 0.13073 | 0.083 97 | 0.704 8 |
| 1.19 | 10.526 | 63 | 0.12870 | | 0.699 3 |
| 1.18 | 11.111 | 63 | 0 12650 | | 0.693 3 |
| 1.17 | 11.764 | 64 | 0.12415 | | 0.686 8 |
| 1.16 | 12.500 | 64 | 0.12182 | | 0.680 3 |
| 1.15 | 13.333 | 64 | 0.11895 | 0.064 71 | 0.672 3 |
| 1.14 | 14.285 | 64 | 0.11608 | | 0 664 1 |
| 1.13 | 16.384 | 64 | 0.11303 | | 0.655 3 |
| 1.12 | 16.666 | 64 | 0.10979 | | 0.645 9 |
| 1.11 | 18.181 | 65 | 0.10641 | | 0 635 8 |
| 1.10 | 20.000 | 65 | 0.10279 | 0.046 27 | 0.624 9 |
| 1.09 | 22.222 | 66 | 0.098992 | | 0.613 3 |
| 1.08 | 25.000 | 66 | 0.094967 | | 0.600 7 |
| 1.07 | 28.571 | 67 | 0.091189 | | 0.588 6 |
| 1.06 | 33.333 | 68 | 0 086376 | | 0 572 9 |
| 1.05 | 40.000 | 69 | 0.081755 | 0.028 65 | 0.557 3 |
| 1.04 | 50 000 | 70 | 0.076857 | | |
| 1.03 | 66 666 | 71 | 0.071853 | | |
| 1.02 | 100.000 | 73 | 0.066469 | | |
| 1.01 | 200.000 | 74 | 0.061 324 | | |
| 1.00 | Infini. | 75 | 0.055472 | 0.011 85 | |

Les observations des tables 1° et 2° s'appliquent également à cette dernière, et pour une voûte de 10 mètres de diamètre à l'intrados, la règle de Perronnet donnant

$$e = 0^{m}.672,$$

on conclut $\frac{R}{r} = 1.13$ et $C = 0.11303$.

La poussée horizontale par mètre courant est alors

$$0.11303 \times r^2 \times 2250 = 6359 \text{ kilog.},$$

et l'épaisseur-limite des pieds-droits, en adoptant la stabilité de Lahire,

$$\sqrt{2C} \times r = 0,6553 \times 5 = 3^{m}.2765.$$

Si les pieds-droits n'avaient qu'une hauteur de 5 mètres, on pourrait prendre pour leur épaisseur $2^{m}.8075$.

**632.** M. Petit a encore considéré les *voûtes en arc de cercle extradossées parallèlement.* Il convient de distinguer le cas où la moitié $\alpha$ de l'angle au centre correspondant à l'arc de la voûte est plus grand que l'angle de rupture donné par la table 1°, page 866, pour une voûte

en plein cintre extradossée parallèlement et pour une même valeur de $\frac{R}{r}$, et le cas où $\alpha$ est plus petit que cet angle de rupture.

R rayon de l'arc d'extrados ;
$r$ rayon de l'arc d'intrados. Ayant $r$, on détermine l'épaisseur de la voûte à la clef, et par suite R, à l'aide de la règle de Perronnet (627).

1° Si $\alpha$ est plus grand que l'angle de rupture, la poussée horizontale est la même que si la voûte était en plein cintre avec R et $r$ pour rayons, et elle se détermine comme au 1° du numéro précédent. Quant à l'épaisseur-limite E des pieds-droits, on la calcule à l'aide de la formule

$$E = r\sqrt{3,8C}.$$

C a la valeur consignée table 1°, page 866.

Dans les cas ordinaires de la pratique, on peut diminuer de 1/10 cette épaisseur-limite.

2° Si le demi-angle $\alpha$ est plus petit que l'angle de rupture donné table 1°, page 866, ce qui a lieu ordinairement dans la pratique, on détermine le rapport C de la poussée au carré du rayon de l'intrados à l'aide de la table suivante, relative à sept valeurs différentes de $\alpha$ ; ayant C, on calcule l'épaisseur-limite des pieds-droits à l'aide de la formule

$$E = r\sqrt{3,8C}.$$

*Tables des poussées des voûtes en arc de cercle extradossées parallèlement* ($l$ est l'ouverture de la voûte et $f$ la flèche de l'arc d'intrados).

| VALEUR du rapport $\frac{R}{r}$ | Rapport C de la poussée au carré du rayon, pour | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | $l = 4f$ $r = 2.500f$ $\alpha = 53°\,7'30''$ | $l = 5f$ $r = 3.625f$ $\alpha = 43°36'10''$ | $l = 6f$ $r = 5f$ $\alpha = 36°52'10''$ | $l = 7f$ $r = 6.625f$ $\alpha = 31°53'26''$ | $l = 8f$ $r = 8.500f$ $\alpha = 28°4'20''$ | $l = 10f$ $r = 13f$ $\alpha = 22°37'10''$ | $l = 16f$ $r = 32.5f$ $\alpha = 14°15'0''$ |
| 1.40 | 0.15445 | 0.14691 | 0.14691 | 0.14691 | 0.14691 | 0.14478 | |
| 1.35 | 0.14717 | 0.13030 | 0.12587 | 0.12587 | 0.12587 | 0.12405 | |
| 1.34 | 0.14543 | 0.12987 | 0.12171 | 0.12171 | 0.12171 | 0.11999 | |
| 1.33 | 0.14364 | 0.12781 | 0.11767 | 0.11767 | 0.11767 | 0.11596 | |
| 1.32 | 0.14173 | 0.12634 | 0.11362 | 0.11362 | 0.11362 | 0.11196 | |
| 1.31 | 0.13975 | 0.12486 | 0.10959 | 0.10959 | 0.10959 | 0.10800 | |
| 1.30 | 0.13764 | 0.12331 | 0.10682 | 0.10559 | 0.10559 | 0.10406 | |
| 1.29 | 0.13543 | 0.12164 | 0.10563 | 0.10163 | 0.10163 | 0.10016 | |
| 1.28 | 0.13311 | 0.11988 | 0.10437 | 0.09770 | 0.09770 | 0.09628 | |
| 1.27 | 0.13068 | 0.11803 | 0.10304 | 0.09379 | 0.09379 | 0.09244 | |
| 1.26 | 0.12815 | 0.11609 | 0.10160 | 0.08992 | 0.08992 | 0.08862 | |
| 1.25 | 0.12547 | 0.11402 | 0.10009 | 0.08668 | 0.08608 | 0.08483 | 0.07189 |
| 1.24 | 0.12270 | 0.11251 | 0.09850 | 0.08549 | 0.08227 | 0.08108 | 0.06862 |
| 1.23 | 0.12031 | 0.10958 | 0.09679 | 0.08423 | 0.07849 | 0.07735 | 0.06547 |
| 1.22 | 0.11675 | 0.10725 | 0.09499 | 0.08291 | 0.07474 | 0.07366 | 0.06234 |
| 1.21 | 0.11354 | 0.10460 | 0.09305 | 0.08148 | 0.07102 | 0.06999 | 0.05924 |
| 1.20 | 0.11023 | 0.10196 | 0.09102 | 0.07999 | 0.06981 | 0.06636 | 0.05616 |
| 1.19 | 0.10676 | 0.09915 | 0.08885 | 0.07834 | 0.06859 | 0.06275 | 0.05311 |
| 1.18 | 0.10313 | 0.09617 | 0.08653 | 0.07651 | 0.06727 | 0.05918 | 0.05008 |
| 1.17 | 0.09934 | 0.09303 | 0.08408 | 0.07468 | 0.06583 | 0.05212 | 0.04709 |
| 1.16 | 0.09537 | 0.08975 | 0.08144 | 0.07264 | 0.06420 | 0.05004 | 0.04411 |
| 1.15 | 0.09123 | 0.08634 | 0.07866 | 0.07050 | 0.06259 | 0.04904 | 0.04116 |
| 1.14 | 0.08690 | 0.08257 | 0.07568 | 0.06812 | 0.06077 | 0.04803 | 0.03824 |
| 1.13 | 0.08238 | 0.07869 | 0.07251 | 0.06558 | 0.05890 | 0.04671 | 0.03534 |
| 1.12 | 0.07764 | 0.07459 | 0.06911 | 0.06297 | 0.05659 | 0.04451 | 0.03247 |
| 1.11 | 0.07269 | 0.07042 | 0.06548 | 0.06026 | 0.05421 | 0.04384 | 0.02962 |
| 1.10 | 0.06737 | 0.06563 | 0.06158 | 0.05666 | 0.05160 | 0.04214 | 0.02681 |
| 1.09 | 0.06241 | 0.06077 | 0.05739 | 0.05345 | 0.04871 | 0.04023 | 0.02401 |
| 1.08 | 0.05636 | 0.05652 | 0.05288 | 0.04934 | 0.04552 | 0.03806 | 0.02192 |
| 1.07 | 0.05052 | 0.05011 | 0.04804 | 0.04426 | 0.04200 | 0.03560 | 0.02141 |
| 1.06 | 0.04431 | 0.04428 | 0.04280 | 0.04058 | 0.03861 | 0.03276 | 0.02002 |
| 1.05 | 0.03776 | 0.03804 | 0.03709 | 0.03550 | 0.03357 | 0.02944 | 0.01882 |
| 1.04 | 0.03096 | 0.03144 | 0.03095 | 0.02992 | 0.02862 | 0.02561 | 0.01720 |
| 1.03 | 0.02378 | 0.02437 | 0.02424 | 0.02369 | 0.02293 | 0.02131 | 0.01524 |
| 1.02 | 0.01625 | 0.01681 | 0.01690 | 0.01673 | 0.01640 | 0.01546 | 0.01199 |
| 1.01 | 0.00834 | 0.00871 | 0.00886 | 0.00889 | 0.00885 | 0.00862 | 0.00747 |

Pour une voûte extradossée parallèlement, dont $\alpha = 28°\ 4'\ 20''$, $l = 8f = 8$ mètres et $r = 8{,}5f = 8^{m},5$, la formule de Perronnet (627) donne pour l'épaisseur de la voûte à la clef

$$e = 0^m,915, \quad \text{d'où} \quad R = 9^m,415 \quad \text{et} \quad \frac{R}{r} = 1,107.$$

Ce rapport tombant entre les valeurs 1,10 et 1,11 du tableau, la différence des valeurs de C correspondant à 1,107 et à 1,11 se détermine à l'aide de la proportion

$$(1,11 - 1,10) : (0,05421 - 0,05160) = (1,11 - 1,107) : x,$$

qui donne $x = 0,000783$; donc $C = 0,05343$.

L'épaisseur-limite des pieds-droits est alors

$$E = 8,5\sqrt{3,8 \times 0,05343} = 3^m,825.$$

Pour une hauteur de pieds-droits de $4^m,25$ on pourrait faire $E = 3^m,244$.

*Glissement des voûtes en arc de cercle sur les joints de leurs naissances.* Le frottement, par mètre courant, de la voûte sur le joint de chaque naissance a pour expression, en adoptant ici 0,76 pour coefficient de frottement,

$$0,38\alpha\left(\frac{R^2}{r^2} - 1\right)r^2 \times 2250 \text{ kilog.}$$

$\alpha$ est le demi-arc, exprimé en mètres, qui correspond à l'angle au centre correspondant à l'arc de la voûte, l'arc $\alpha$ étant décrit avec un mètre pour rayon ; ainsi, pour un angle au centre de 25°, on a $\alpha = \frac{25 \times 2 \times 3.14}{360} = 0^m.436$.

La poussée horizontale par mètre courant est, en prenant pour C la valeur consignée au tableau précédent,

$$Cr^2 \times 2250 \text{ kilog.}$$

Pour le système $l = 4f$, la poussée surpasse le frottement quand $\frac{R}{r}$ est égal ou inférieur à 1,06. Pour les systèmes $l = 5f$, $l = 6f$, $l = 7f$, $l = 8f$ et $l = 10f$, le glissement commence à $\frac{R}{r} = 1,15$. Pour le système $l = 16f$ et tous les systèmes plus surbaissés, le glissement a lieu quelle que soit l'épaisseur de la voûte.

Lorsque la poussée dépasse le frottement, il faut employer des tirants, arcs-boutants, etc., capables de résister à l'excès de la poussée sur le frottement.

*Pour les voûtes en anse de panier*, on pourra calculer l'épaisseur à donner aux pieds-droits comme pour une voûte en arc de cercle de même ouverture et de même flèche (628).

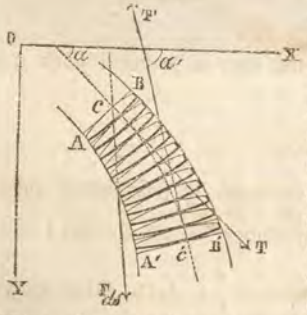
633. *Théorie des voûtes* par M. Yvon Villarceau, théorie qui a valu à son auteur l'approbation la plus flatteuse de la part de l'Académie.

Comme le fait voir ce qui précède, les ingénieurs et les architectes qui s'étaient occupés de la théorie si délicate des voûtes, supposant connues les formes de l'intrados et de l'extrados, avaient cherché les conditions d'équilibre que ces formes exigeaient, afin d'en conclure le mode de répartition des charges le plus favorable à la stabilité. La pratique exigeant une répartition de charges assez rigoureusement déterminée, on conçoit les difficultés que l'on doit éprouver pour satisfaire le plus convenablement possible aux conditions de stabilité d'une voûte; aussi ces conditions sont-elles rarement satisfaites d'une manière rigoureuse.

M. Yvon Villarceau, pour arriver à satisfaire d'une manière certaine, et la plus convenable, aux conditions d'équilibre, envisage la question sous un point de vue tout différent : ainsi, prenant précisément pour inconnues les données de la théorie habituelle, il se propose de rechercher les formes d'intrados et d'extrados qui assureront la plus grande stabilité d'une voûte destinée à supporter des charges dont les intensités et le mode de répartition sont fixés d'avance par les exigences de la pratique, et cela, tout en fixant, *à priori*, la flèche et l'ouverture de l'arche. C'est ainsi que le problème se présente ordinairement dans la pratique.

Pour établir ces conditions d'équilibre, M. Yvon Villarceau fait deux hypothèses :

Fig. 89.




D'abord, il imagine que, sans altérer en rien le poids des voussoirs et la position de leurs centres de gravité (cette position suppose les voussoirs infiniment minces et les plans de joints normaux à la courbe $cc'$ passant par les centres de gravité de ces voussoirs), on leur donne la forme indiquée par la fig. 89, c'est-à-dire qu'on les taille de telle manière qu'ils ne soient en contact que suivant les arêtes ou génératrices qui ont leurs pieds sur la courbe $cc'$ des centres de gravité des voussoirs.

Ensuite il fait abstraction du frottement et de la résistance qu'oppose l'adhésion du mortier au glissement des voussoirs les uns sur les autres, qui du reste ne se développent pas en se conformant aux dispositions indiquées par la théorie.

Il est évident que si l'équilibre peut exister dans un système établi suivant ces hypothèses, il subsistera *à fortiori* lorsqu'on remplacera le contact des arêtes par celui des plans de joint, et que l'adhésion des

mortiers ainsi que le frottement pourront prendre naissance, le rôle de ces dernières forces étant de s'opposer au glissement, quand il tend à se produire.

Seulement, il faut remarquer que la pression T, qui se répartirait également sur tous les points du plan du joint, dans le cas où elle passerait par le centre de gravité de ce joint, ne se partagera pas également entre tous ces points, puisque les centres de gravité des faces des voussoirs ne se trouvent pas sur la courbe $cc'$, mais se projettent sur les points milieux de l'épaisseur de la voûte. Les centres de gravité des volumes des voussoirs se projetant plus près de l'extrados que ceux des faces de joint, on voit que lorsqu'on remplacera les arêtes de contact par les faces de joint, la pression par unité de surface sera plus grande vers l'extrados que vers l'intrados. Mais les distances des points de la courbe $cc'$ aux points milieux des épaisseurs qui leur correspondent étant très-petites, on peut généralement ne pas tenir compte de cette inégale répartition des pressions; la pression maximum ne différera que très-peu de la pression moyenne. D'ailleurs il suffira, pour faire disparaître cette inégalité, de *refouiller* le joint à l'intrados, à une profondeur très-petite, et telle que la courbe des centres de gravité $cc'$ passe par le milieu du joint réel; dans la pratique cette précaution est négligeable.

Il y a un grand avantage à ce que la résultante des pressions passe très-près du milieu de l'épaisseur, et soit en même temps normale au plan de joint; car si la voûte est soumise accidentellement à des charges auxquelles on n'aura point eu égard en fixant les conditions de son établissement, l'action de celles-ci sera, tant que l'équilibre pourra subsister, de déplacer le point d'application de la résultante des pressions, en faisant varier son intensité et sa direction. Or, pour que cette résultante puisse se déplacer dans un sens ou dans l'autre, sans trop se rapprocher de l'extrados ou de l'intrados, ni trop s'écarter de la direction de la normale, il est évident qu'elle doit passer par le milieu de l'épaisseur et être normale au joint lorsque les surcharges dont il s'agit n'ont pas lieu, c'est-à-dire lorsque la voûte est seulement soumise à l'action des forces qu'on a fait entrer dans le calcul de son établissement.

Cela posé, considérant l'équilibre d'une portion quelconque $cc'$ de voussoirs du système de la fig. 89, soient $x$, $y$, et $x'$, $y'$ les coordonnées de $c$ et $c'$.

Les forces extérieures de ce système sont :

| | |
|---|---|
| T | pression agissant en $c$; |
| T′ | pression agissant en $c'$; |
| $dP$ | les poids des voussoirs; |
| $Fds$ | les autres forces extérieures qui agissent sur les divers points du système et passent par les centres de gravité des voussoirs. |

Ces diverses forces étant dans un même plan, trois des six conditions d'équilibre d'un système solide sont satisfaites, et il ne reste qu'à appliquer les trois autres (*Int.*, 1497 et 1499).

Deux de ces équations (1) et (2), expriment que la somme des projections des forces extérieures sur chacun des axes X, Y est nulle ; la troisième, (3), exprime que la somme des moments de ces forces ou de leurs composantes par rapport à un troisième axe perpendiculaire aux deux premiers à l'origine O est également nulle.

$$\mathrm{T}\cos\alpha - \mathrm{T}'\cos\alpha' + \int_x^{x'} \mathrm{F}_x ds = 0. \tag{1}$$

$$\mathrm{T}\sin\alpha - \mathrm{T}'\sin\alpha' + \int_x^{x'} \mathrm{F}_y ds + \int_x^{x'} d\mathrm{P} = 0. \tag{2}$$

$$x\,\mathrm{T}\sin\alpha - x'\mathrm{T}'\sin\alpha' - (y\,\mathrm{T}\cos\alpha - y'\mathrm{T}'\cos\alpha') + \int_x^{x'} x\mathrm{F}_y ds - \int_x^{x'} y\mathrm{F}_x ds + \int_x^{x'} x d\mathrm{P} = 0. \tag{3}$$

L'indice $x$ ou $y$ indique, par exemple, que $\mathrm{F}_x$ est la projection de la force F sur l'axe des $x$, et $\mathrm{F}_y$ celle de F sur l'axe de $y$.

Or remarquons que ces équations devant avoir lieu pour un intervalle quelconque $cc'$, compté sur la courbe des centres de gravité, elles subsisteront encore lorsque cet intervalle sera infiniment petit et égal à $ds$. Dans ce cas, $x'$ deviendra $x + dx$, et les quantités $\alpha'$ et T', qui sont des fonctions de $x'$, deviendront $\alpha + d\alpha$, et $\mathrm{T} + d\mathrm{T}$, de telle sorte que l'on aura

$$\mathrm{T}'\cos\alpha' - \mathrm{T}\cos\alpha = (\mathrm{T} + d\mathrm{T})\cos(\alpha + d\alpha) - \mathrm{T}\cos\alpha = d(\mathrm{T}\cos\alpha),$$

et de même

$$\mathrm{T}'\sin\alpha' - \mathrm{T}\sin\alpha = d(\mathrm{T}\sin\alpha),$$

tandis que les intégrales contenues dans ces mêmes équations se réduiront à un de leurs éléments.

En supposant donc l'intervalle $cc'$ infiniment petit, et ayant égard aux remarques précédentes, les équations d'équilibre (1) et (2) deviennent :

$$d(\mathrm{T}\cos\alpha) = \mathrm{F}_x ds, \tag{4}$$

$$d(\mathrm{T}\sin\alpha) = \mathrm{F}_y ds + d\mathrm{P}. \tag{5}$$

Quant à l'équation (3), elle prend une forme telle, qu'il est facile de voir qu'elle est une conséquence des équations (4) et (5).

Ces deux dernières équations étant applicables à un élément quelconque de la voûte, elles expriment les conditions nécessaires et suffisantes pour assurer l'équilibre du système.

Appelant :

$\varepsilon$ l'épaisseur AB de la voûte au point dont les coordonnées sont $x$ et $y$ (fig. 89) ;
$t$ la pression moyenne sur la face AB, lorsque les surfaces de contact sont rétablies. La pression maximum par unité superficielle différant très-peu de $t$ dans le joint AB, on peut poser $T = \lambda\varepsilon t$ ;
$\lambda$ la dimension du joint, parallèlement à l'axe de la voûte ;
$\omega$ le poids de l'unité de volume des matériaux dont est construite la voûte ;
$j$ la largeur du voussoir, mesurée suivant la courbe passant par le milieu des épaisseurs des voussoirs, et différant très-peu de la largeur mesurée suivant la courbe $cc'$ des centres de gravité ;
$\rho$ le rayon de courbure de $cc'$ ;
$\delta$ la distance de la courbe $cc'$ au milieu de l'épaisseur de la voûte ;
$2\delta$ la profondeur du refouillement des joints ;
$s$ la longueur de la courbe $cc'$, et $ds$ celle de son élément,

$\mu = \dfrac{t}{\omega}$.

on a :

$$T = \lambda\varepsilon t, \quad T\cos\alpha = \lambda\varepsilon t\frac{dx}{ds}, \quad T\sin\alpha = \lambda\varepsilon t\frac{dy}{ds},$$

et

$$dP = \omega\lambda\varepsilon j = \omega\varepsilon ds\left(1-\frac{\delta}{\rho}\right); \tag{6}$$

d'où il résulte, pour équations d'équilibre, en substituant ces valeurs dans les équations (4) et (5) et divisant tout par $\lambda$ :

$$\left.\begin{aligned} d\left(\varepsilon t\frac{dx}{ds}\right) &= \frac{F_x ds}{\lambda} \\ d\left(\varepsilon t\frac{dy}{ds}\right) &= \frac{F_y ds}{\lambda} + \omega\varepsilon\left(1-\frac{\delta}{\rho}\right)ds \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

On a aussi

$$1-\frac{\delta}{\rho} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{1-\frac{1}{3}\frac{\varepsilon^2}{\rho^2}}, \tag{8}$$

d'où

$$\frac{\varepsilon}{\rho} = \sqrt{12\frac{\delta}{\rho}\left(1-\frac{\delta}{\rho}\right)}, \tag{8 bis}$$

et

$$\frac{\delta}{\rho} = \frac{\dfrac{1}{12}\dfrac{\varepsilon^2}{\rho^2}}{\dfrac{1}{2} + \dfrac{1}{2}\sqrt{1-\dfrac{1}{3}\dfrac{\varepsilon^2}{\rho^2}}}. \tag{9}$$

Formule de laquelle on tire, pour valeur approchée aux quantités près du quatrième ordre,

$$\frac{\delta}{\rho} = \frac{1}{12}\frac{\varepsilon^2}{\rho^2}; \tag{9 bis}$$

ce qui confirme ce qui a été avancé sur la petitesse de la distance de $cc'$ au milieu de l'épaisseur de la voûte.

Les équations (7) servent de base à la discussion des diverses questions que peut présenter la théorie des voûtes.

*Questions à résoudre.* Les équations (7) contiennent, outre la variable $x$, que l'on peut prendre pour variable indépendante, les variables $y$, $\varepsilon$, $t$, $F_x$, $F_y$, qui sont des fonctions connues ou inconnues de $x$. Or ces cinq quantités ne sont liées entre elles que par deux équations : on peut donc se donner arbitrairement trois d'entre elles, et les équations serviront à faire connaître les deux autres. Toutefois, on observe que les deux variables $F_x$ et $F_y$ n'équivalent qu'à une seule, la force F, qu'on ne peut assigner sans fixer à la fois son intensité et sa direction, c'est-à-dire sans fixer à la fois ses deux composantes $F_x$ et $F_y$.

On voit qu'on pourra résoudre, à l'aide des équations (7), six séries de questions qu'on peut écrire analytiquement, étant donnés :

$$t \text{ et F}, \quad \varepsilon \text{ et F}, \quad y \text{ et F}, \quad y \text{ et } \varepsilon, \quad y \text{ et } t, \quad \varepsilon \text{ et } t,$$

trouver respectivement :

$$y \text{ et } \varepsilon, \quad y \text{ et } t, \quad \varepsilon \text{ et } t, \quad t \text{ et F}, \quad \varepsilon \text{ et F}, \quad y \text{ et F}.$$

Il est à remarquer que les trois premières questions sont déterminées, parce qu'on suppose F donnée d'intensité et de direction en fonction de $x$, et qu'il reste à déterminer, dans chaque cas, deux inconnues au moyen de deux équations.

Les trois derniers problèmes sont indéterminés sous la forme donnée ici à leur énoncé, parce que la force F représente deux inconnues : $F_x$, $F_y$, et qu'il y aurait à déterminer les valeurs de trois inconnues au moyen de deux équations; on devra donc, en outre, se donner la direction de F, ou l'une de ses composantes, dans chacun de ces trois derniers cas.

Les données qu'on voudra choisir dans le tableau précédent pouvant être établies d'une manière quelconque en fonction de $x$, on conçoit que chacun des six cas présentés peut lui-même donner lieu à une infinité de questions.

*Première série de questions.* Étant donnés $t$ et F, trouver $y$ et $\varepsilon$.

Comme il convient dans la pratique que la pression par unité de surface soit constante et égale à la pression maximum que l'on peut faire supporter à la pierre, toutes les fois que l'on pourra prendre $t$ arbitrairement, on le choisira de manière à satisfaire à ces conditions.

Quant à la valeur de F, elle dépend des questions qu'on se propose de résoudre.

Par exemple, on peut supposer $F = 0$, ce qui revient à dire que la voûte que l'on considère ne sera soumise qu'à l'action de son propre poids, ou qu'elle n'aura d'autre objet que de recouvrir un espace déterminé.

Dans les ponts, la valeur de F peut être donnée, du moins hypothétiquement.

Si la voûte était recouverte d'eau, la valeur de F serait celle de la pression normale, proportionnelle à la profondeur de la partie considérée de l'extrados au-dessous de la surface de l'eau.

M. Yvon Villarceau, en intégrant les formules différentielles précédentes, résout d'abord le problème : étant donnés $t$ constant et $F = 0$, trouver $y$ et $\varepsilon$, c'est-à-dire déterminer la forme d'une voûte pressée seulement à ses extrémités, et dans laquelle la pression par unité de surface, au contact de chacun des plans normaux, soit constante et égale à celle qu'il convient de faire supporter aux matériaux.

M. Yvon Villarceau résout ensuite le même problème pour les voûtes qui supportent, outre le poids de leurs voussoirs, une surcharge agissant normalement à la courbe des centres de gravité des voussoirs, circonstance qui ne se réalise rigoureusement qu'autant que la voûte est chargée d'un liquide, mais dont on se rapproche pour une surcharge en maçonnerie, semblable à celle des voûtes de ponts par exemple, en appareillant l'extrados suivant une courbe continue, et non en redans comme on avait l'habitude de le faire.

Dans un récent travail, M. Yvon Villarceau a réduit en tables les résultats que fournissent ses formules fondamentales. Ces tables et quelques formules empiriques donnent tous les éléments nécessaires à l'établissement des voûtes.

Nous terminerons en disant que M. Yvon Villarceau, par l'application de sa théorie à un certain nombre d'arches en anse de panier des ponts les plus célèbres qui existent, a reconnu que toutes pèchent plus ou moins gravement contre l'emploi économique des matériaux et contre le rapport qui doit exister entre la flèche et l'ouverture. Ce rapport doit, pour les voûtes en anse de panier, rester compris entre 1/3 et 1/4, et ne jamais atteindre ni l'une ni l'autre de ces limites, comme on l'a presque toujours fait jusqu'à présent; il doit se rapprocher du 1/3 dans les arches d'une faible ouverture, et du 1/4 dans celles à grande portée. Au 1/4, les pierres ne sont plus assez résistantes; au 1/3, les épaisseurs fournies par la théorie devraient, pour satisfaire à toutes les conditions qu'on s'est imposées, recevoir des valeurs considérables, et les pressions dans les joints seraient faibles, ce qui impliquerait un vice d'économie dans l'emploi des matériaux. La forme de plein cintre répond à des charges infiniment grandes, et ne convient par conséquent pas aux arches de ponts. Celle des tunnels s'en rapproche au contraire en raison des charges considérables que leurs voûtes ont à supporter.

M. Yvon Villarceau a reconnu que dans la plupart de nos grands ponts on aurait pu réduire d'un tiers environ l'épaisseur des voûtes qui ont été surbaissées au 1/3, sans faire subir aux voussoirs des pres-

sions excédant le dixième, ou même le quinzième des charges de rupture, et cela, en diminuant convenablement la flèche, ce qui eût permis d'exhausser les naissances sans changer le niveau du pavé de la chaussée. Cet exhaussement, joint à la réduction de l'épaisseur à la clef, eût offert au passage des eaux un débouché plus considérable, en même temps qu'il eût facilité la navigation. Ainsi, au pont de Roanne, les naissances eussent pu être élevées de 80 centimètres, et la clef être réduite à 92 centimètres d'épaisseur. Il n'en fallait peut-être pas davantage pour sauver ce pont de la ruine qui l'a atteint dans le débordement de la Loire.

M. Yvon Villarceau a calculé tous les éléments de trois arches différentes : l'une, dite en arc de cercle, établie sur les données du pont d'Iéna, c'est-à-dire ayant 25 mètres d'ouverture et 3 mètres de flèche, une seconde, aussi dite en arc de cercle, de 45 mètres d'ouverture et 5 mètres de flèche; la troisième en anse de panier, de 60 mètres d'ouverture et $16^{m},25$ de flèche. L'épaisseur de $1^{m},86$ et la pression horizontale à la clef seraient les mêmes dans la voûte en anse de panier de 60 mètres d'ouverture que dans celle dite en arc de cercle de 45 mètres. La pression dans le joint des naissances serait représentée par une colonne de pierre de 112 mètres de hauteur; ce qui est bien inférieur au dixième de la charge de rupture des matériaux d'excellente qualité, qu'on emploie dans ces sortes de constructions. Une telle arche serait la plus hardie qui eût jamais été construite de main d'homme.

Au pont d'Iéna, la distance maximum de l'intrados théorique à l'arc de cercle qui existe, et qui a même ouverture et même flèche, est de 14 centimètres; ce maximum a lieu à une distance horizontale de l'axe de la voûte égale aux 7/10 de la demi-ouverture. Dans l'arche de 45 mètres, l'écart maximum de l'arc de cercle au-dessous de l'intrados théorique est de 30 centimètres, et, comme dans le cas précédent et dans le suivant, il se trouve encore aux 7/10 de la demi-ouverture à partir de l'axe de la voûte. Dans la voûte en anse de panier de 60 mètres d'ouverture, le plus grand écart entre l'intrados théorique et l'ellipse qui a pour grand axe l'ouverture de l'arche et pour demi petit axe la flèche, est de 40 centimètres.

Les écarts qui existent entre l'exécution et la théorie sont bien rarement négligeables. Ainsi M. Yvon Villarceau prouve que quand il est d'un sixième de l'épaisseur, comme dans la voûte dite en arc de cercle de 45 mètres d'ouverture, la pression vers l'extrados devient double de la pression uniforme qui a lieu sur le joint correspondant dans sa construction, tandis qu'elle est nulle à l'intrados. Dans la voûte en anse de panier, où l'écart de 40 centimètres est de beaucoup supérieur au sixième de l'épaisseur de la voûte, le joint tend à s'ouvrir à l'intrados jusqu'à une profondeur de 14 centimètres, tandis qu'à l'extrados la pression

est égale à deux fois et un dixième celle qui a lieu uniformément sur tout le joint de l'arche proposée.

Avant de passer à la construction proprement dite des voûtes, nous ferons mention de l'*Étude sur la stabilité des voûtes*, par M. Carvallo, ingénieur des ponts et chaussées, dans laquelle MM. les ingénieurs et constructeurs trouveront des renseignements théoriques et pratiques bien propres à les éclairer dans l'établissement de ces constructions (*Annales des ponts et chaussées*, 1853).

**634.** La *construction des voûtes* comprend quatre phases distinctes (560): 1° l'établissement et le levage des cintres; 2° l'exécution de la maçonnerie sur cintres; 3° le décintrement; 4° les travaux complémentaires qui ne doivent être faits qu'après le décintrement.

*Cintres.* Les cintres de ponts s'exécutent en charpente. L'espacement des *fermes* varie de $1^m,25$ à $2^m,00$. A égalité, et même avec un léger excès de dépense, on doit donner la préférence aux fermes peu espacées, lesquelles, étant moins chargées, se prêtent mieux à un décintrement méthodique et gradué. Les couchis se posent jointifs lorsque les voûtes sont en petits matériaux; ils forment ainsi une espèce de plancher sur lequel les ouvriers circulent. Quand au contraire les voûtes sont en pierres de taille, les couchis sont espacés entre eux, car alors il suffit qu'au milieu de chaque rang de voussoirs se trouve une file de couchis, de manière que tous les joints correspondent à un espace libre et soient accessibles par-dessous. La largeur des couchis varie de 1 fois à 3 fois au plus leur épaisseur.

Les fermes de cintres peuvent être combinées suivant trois principes différents : ou bien ces fermes ne sont soutenues qu'à leurs naissances par la maçonnerie, qui supporte à la fois la charge verticale et la poussée horizontale de ces fermes, on dit alors que les cintres sont *retroussés;* ou bien il existe, d'une naissance à l'autre, un certain nombre de points fixes dont l'effet est réellement de partager la ferme totale en plusieurs autres de moindre ouverture, on dit alors que les cintres sont *fixes;* enfin on emploie encore un système *mixte*, qui consiste à établir d'abord les fermes de manière qu'elles puissent être soutenues sur leurs deux naissances seulement, puis à les étayer, pendant la construction, au moyen d'un certain nombre d'appuis fixes. On trouve dans cette dernière disposition l'avantage de pouvoir partager en deux l'effet du décintrement, en supprimant d'abord les étais, puis en n'enlevant le cintre proprement dit qu'après le premier effet du tassement.

Quelle que soit la composition d'un appareil de cintre, il est indispensable qu'il soit *contre-venté*, c'est-à-dire que les fermes soient reliées entre elles par des moises horizontales ou en écharpe. De plus, il est indispensable : 1° *d'empêcher le relèvement du sommet des fermes au moyen de grandes moises ou de brides partant de ce sommet et fixées vers les naissances, et d'ailleurs au moyen d'une surcharge*

*provisoire sur le sommet pendant la construction des reins; 2° de ramener autant que possible tous les efforts à des résultantes horizontales qui se neutralisent réciproquement, en montant la voûte symétriquement des deux côtés à la fois.*

Lors de la pose des cintres, la plupart des constructeurs ont l'habitude de donner aux fermes un certain surhaussement, dont l'objet est de contre-balancer à peu près l'abaissement du sommet de la voûte qui peut résulter, tant du tassement du cintre pendant la construction que de celui de la voûte elle-même après le décintrement. Dans l'état actuel de la science, et quoique plusieurs constructeurs se soient beaucoup occupés de cette question, le mode et la quantité de surhaussement ne peuvent absolument point être calculés, et, à cet égard, force est d'agir un peu au hasard.

Cet exhaussement des cintres paraît bien motivé par les tassements suivants observés après le décintrement de quelques ponts.

| PONTS. | SYSTÈME. | OUVERTURES. | TASSEMENTS. |
|---|---|---|---|
| De Nemours. . . . | En arc de cercle. | 16m.20 | 0m.203 |
| De Nogent. . . . . | En anse de panier. | 29 .25 | 0 .446 |
| De Neuilly. . . . . | *Id.* | 39 .00 | 0 .660 |
| De Mantes. . . . . | *Id.* | 39 .00 | 0 .557 |
| De Saint-Sauveur. | *Id.* | 23 .38 | 0 .221 |
| D'Iéna. . . . . | En arc de cercle. | 28 .00 | 0 .120 |

Ce tableau montre qu'aux ponts Saint-Sauveur et d'Iéna le tassement a été beaucoup moindre qu'aux ponts construits antérieurement. Dans les ponts plus récents, par suite de la moindre épaisseur des joints, qui ne doit jamais dépasser 0m,02, du soin apporté à les remplir et surtout de la meilleure qualité des mortiers, le tassement a encore été bien moindre; ainsi au *pont aux Doubles* et au *Petit pont*, qui viennent d'être reconstruits en meulière hourdée en ciment de Vassy, on n'a reconnu aucun tassement après le décintrement, malgré la grande hardiesse de ces ponts, qui sont en arc de cercle. Avec les mortiers de chaux il est impossible sans doute d'obtenir un pareil résultat; mais leurs qualités permettent cependant de donner à la courbe du cintre rigoureusement celle du projet, sans l'exhausser au sommet, et même de ne pas élever ses naissances, un léger tassement de tout l'ensemble étant en général de peu d'importance.

*Pose des voussoirs.* Pour faire cette opération, on commence d'abord par établir la division des voussoirs, conformément à l'épure, à chacune des extrémités du cintre, en marquant ces points de division, soit par des petites encoches sur les couchis, soit en y clouant des pointes;

puis, lors de la pose de chaque rang de voussoirs, on trace, au moyen de règles, sur les couchis, la ligne d'arrase du lit supérieur de ce rang, en donnant des points intermédiaires avec des *nivelettes*, ou en tendant un cordeau entre les points marqués aux extrémités du cintre.

Le principe de la non-continuité des joints dans deux assises contiguës doit être rigoureusement observé.

Afin de diriger tous les plans de joints normalement à l'intrados, on se sert d'une ou de plusieurs fausses équerres levées sur l'épure de la voûte, et dont l'un des côtés est une certaine longueur de l'arc d'intrados, tandis que l'autre côté est normal à cet arc. Si l'intrados est tracé à plusieurs centres, il faut changer ces fausses équerres chaque fois qu'on passe d'un arc à l'autre. Au pont Notre-Dame, dont les voûtes sont en ellipse, ce qui a nécessité un panneau en volige pour chaque assise de voussoirs, on a remplacé les fausses équerres en traçant au chantier, sur la tête de chaque voussoir, une ligne bien apparente qui devait être verticale après la pose du voussoir.

Les voussoirs se posent sur un lit de mortier, sur lequel on les tasse avec un maillet en bois, de manière que l'épaisseur des joints soit uniforme et d'un centimètre et demi pour les voûtes de grandes dimensions, et au moins de 8 millimètres pour les petites.

Les deux côtés de la voûte se montent en même temps, d'abord pour que leurs poussées se fassent équilibre sur le cintre et ne le détruisent pas, et ensuite pour que, les mortiers prenant la même consistance des deux côtés, le tassement soit égal. Il convient aussi de ne commencer une nouvelle assise de voussoirs que quand celle inférieure est entièrement posée. Au pont Notre-Dame on s'est écarté de ces prescriptions, ainsi on a commencé par poser sur cales tous les voussoirs en pierre de taille formant les deux têtes, puis on a fiché les joints en ciment de Vassy. Ces deux têtes terminées, on a procédé à la pose des voussoirs intermédiaires, qui sont de forts moellons piqués dont deux assises forment une assise des têtes; comme pour les têtes, on a posé ces moellons sur cales, et on les a fichés en ciment au fur et à mesure, mais de manière à avoir toujours au moins deux assises non fichées, afin de ne pas déranger les voussoirs posés. Une fois le premier rouleau posé sur tout le cintre, on a complété l'épaisseur de la voûte entre les têtes, puis fait le remplissage des reins et établi les chapes en ciment et bitume. On conçoit que par ce mode d'opérer, la charge des cintres se trouve bien diminuée et placée progressivement.

La partie la plus délicate de l'exécution d'une voûte est sa *fermeture*, qui doit être faite de manière à limiter, autant que possible, l'abaissement au sommet lors du décintrement, lequel résulte, comme nous l'avons dit, en grande partie de la compression des mortiers. Cette opération se fait de plusieurs manières distinctes, dont la plus communément suivie est celle que nous avons décrite au n° 560.

Quelques constructeurs emploient le moyen suivant, qui consiste, après avoir recouvert d'un lit de mortier les joints des contre-clefs, à suspendre la clef au-dessus de l'espace qu'elle doit occuper au moyen d'une louve et d'une petite chèvre, et à la laisser tomber à sa place en la dirigeant en conséquence. Cette opération bien réussie peut donner des résultats satisfaisants ; mais elle nous paraît d'une exécution tellement difficile, que nous pensons qu'il est prudent de donner la préférence à la manière d'opérer indiquée au n° 560, ou à la suivante, qui la remplace avec de grands avantages.

Cette troisième méthode consiste à poser à sec sur les cintres les contre-clefs et la clef, en les espaçant avec des cales de manière à réserver l'épaisseur de joints, et à ficher ensuite ces derniers avec du mortier de ciment, que l'on a soin de ne pas gâcher trop clair ; en ébranlant légèrement chaque pierre on peut faciliter la pénétration du mortier en tous les points.

*Voûtes en petits matériaux.* Pour les voûtes en moellons, briques, etc., le mode d'exécution est à peu de chose près le même que pour celles en pierre de taille (560). Les joints ne doivent pas se correspondre dans deux assises voisines, et quand la voûte est en moellons ou en meulières piqués, ou en briques, il faut tracer les joints longitudinaux sur les couchis. L'ouvrier doit poser chaque voussoir en le frottant sur les couchis du cintre, afin que son parement de douelle s'y applique bien et qu'il ne reste pas de mortier interposé ; autrement il en résulterait des balèvres d'un aspect désagréable après le décintrement, et que l'on ne pourrait faire disparaître qu'en retaillant l'intrados.

La voûte du *pont aux Doubles*, à Paris, a été construite en meulière hourdée en ciment de Vassy ; elle a 31 mètres d'ouverture, $3^{m},10$ de flèche, $1^{m},30$ d'épaisseur à la clef, et 16 mètres de tête en tête. On l'a établie en quatre parties éloignées de $1^{m},00$ l'une de l'autre et des naissances ; les cinq intervalles étaient occupés par des encaissements en bois situés aux naissances, aux reins et à la clef. Les 4 voussoirs ont d'abord été exécutés ensemble et sur une épaisseur de $1^{m},00$ environ ; puis on a enlevé les encaissements et on en a rempli simultanément tous les emplacements avec de la même maçonnerie que pour les voussoirs ; on a ensuite complété l'épaisseur de la voûte. Par ce moyen, on a évité les ruptures qui ont ordinairement lieu aux naissances et vers les reins lors de l'exécution des voûtes, et on a obtenu une voûte composée en quelque sorte d'un seul voussoir. Lors du décintrement, il a été impossible de remarquer aucun abaissement à la clef, ni la plus légère fissure aux naissances et aux reins. Ce n'est qu'après le premier hiver que, par suite de la dilatation et de la contraction dues aux variations de température, on a remarqué un léger fendillement aux naissances.

Au *Petit pont*, qui a les mêmes dimensions que le *pont aux Doubles*

si ce n'est que son ouverture est de 32m,50 en aval et 31 mètres en amont, pour construire la voûte on a commencé par faire un premier rouleau sur tout le cintre avec des meulières piquées, en laissant un intervalle aux naissances et à la clef. Cette première assise étant posée, on l'a fermée aux naissances et à la clef. On a fait ensuite le complément de l'épaisseur de la voûte, en ne la fermant encore qu'en dernier lieu aux naissances et à la clef. Les parties apparentes sont en meulière piquée; sur les têtes, deux voussoirs forment l'épaisseur de la voûte. Au *pont aux Doubles*, toute la maçonnerie a été couverte de ciment de Vassy, dans lequel on a refouillé des joints pour imiter la pierre de taille. Les parapets de l'un et l'autre de ces ponts sont en belle pierre de taille, et leurs extrados sont, comme les douelles, des surfaces profilées par des arcs de cercle.

*Décintrement des voûtes.* Avant d'exposer quand et comment on doit effectuer le décintrement des voûtes, nous allons rappeler ce qui se pratiquait et ce qui se fait encore quelquefois en pareil cas.

Des constructeurs professent que la maçonnerie d'une voûte doit être laissée sur cintres un mois ou six semaines, c'est-à-dire jusqu'à ce que le mortier soit sec. Suivant le même système, on enlève successivement les couchis depuis les naissances jusqu'à la clef, en ruinant les cales qui séparent ces couchis des fermes. Quand cette manœuvre devient impraticable, à cause de la grande pression que supportent les derniers couchis, on affaiblit peu à peu, au ciseau, les abouts des arbalétriers, de manière à obtenir un tassement lent et progressif. Dans quelques circonstances, fort rares heureusement, on a ruiné les points d'appui mêmes des fermes, en décintrant ainsi brusquement.

D'autres constructeurs croient qu'il peut être bon d'opérer d'une manière diamétralement opposée.

D'abord il est prouvé maintenant, par de nombreux exemples, que, tant sous le rapport de la stabilité que sous celui du tassement, il n'y a aucun désavantage à décintrer les voûtes presque immédiatement après la pose des clefs; mais, d'un autre côté, sous le rapport des mouvements, imperceptibles ou non, qui s'accomplissent dans la voûte au moment du décintrement, il y a, on n'en saurait douter, tout avantage à ce qu'alors le mortier soit encore dans un état qui lui permette de se comprimer, de se mouler suivant de nouvelles figures, sans que sa désorganisation s'ensuive. Il semble donc qu'*il faut maçonner les voûtes et les décintrer le plus promptement qu'on pourra*, afin d'éviter qu'il n'y ait quelques portions de mortier complétement prises au moment du décintrement.

En second lieu, tout le monde reconnaît qu'il faut se garder de laisser prendre aux voûtes une certaine vitesse lorsqu'elles s'abaissent au décintrement. L'expérience prouve, en effet, que ces modifications d'équilibre dans les maçonneries, même leur écrasement, même leur

renversement, sont loin d'être instantanées, et demandent au contraire, pour s'accomplir, un temps appréciable. Il faut donc que le décintrement soit fait et dirigé de telle manière, que les cintres ne quittent la voûte que par progression insensible et en plusieurs phases, séparées par un intervalle de temps notable; il est bon même, en cas d'accident prévu, que ce décintrement puisse être arrêté à un instant donné, de telle sorte que la voûte se retrouve sur ses cintres, comme avant le commencement de l'opération. Or on peut atteindre ce but en substituant au procédé de décintrement ci-dessus rappelé le suivant, qui est goûté par beaucoup de praticiens.

Chaque ferme du cintre n'étant maintenue qu'à ses deux extrémités par des coins doubles, à petit angle, on lui imprime un mouvement aussi modéré qu'on veut, soit d'abaissement vertical, soit d'écartement horizontal, en faisant glisser l'un sur l'autre les deux coins d'une même paire. Il suffit souvent, pour la manœuvre dont il s'agit, de placer à chaque pied de ferme un ouvrier, muni d'une cognée de charpentier ou d'un têtu de tailleur de pierre, qui frappe à petits coups sur le coin inférieur de la paire portant sur la semelle traînante. Quelquefois on éprouve de grandes difficultés pour faire glisser ce coin, à cause du poids considérable qui agit dessus; il arrive même assez souvent, lorsque ce coin est un peu desserré, que cette pression le lance avec force jusqu'au pied-droit opposé: les ouvriers doivent toujours se placer de manière que, ce cas arrivant, ils ne puissent être atteints. Le constructeur doit diriger l'opération et avoir l'œil sur les ouvriers, afin qu'ils agissent tous, autant que possible, d'une manière identique. Dans les premiers instants, et quoique l'abaissement des fermes soit accusé par le mouvement des coins, l'effet du décintrement de la voûte n'est pas visible, parce que tout l'espace rendu libre est successivement occupé en vertu de la réaction d'élasticité des bois, dont la compression décroît graduellement; en un mot, le cintre quitte la voûte comme un ressort qui se débande lentement. Lorsqu'une fois il s'est fait un jour continu entre l'intrados et la nappe des couchis, on peut enlever complétement les coins et ensuite les couchis; mais il vaut mieux différer d'un jour ou deux pour attendre les effets du tassement, lesquels peuvent très-bien ne se révéler qu'après ce délai.

Quelle que soit l'ouverture de la voûte, le mode de décintrement qu'on vient de décrire reste applicable.

Le système de coins a été remplacé avantageusement par plusieurs constructeurs français, pour des voûtes de ponts, par des sacs de forte toile remplis de sable bien tassé, et dont l'ouverture est cousue avec du fil très-fort ou seulement ficelée. Ces sacs se placent aux mêmes endroits que les coins dans le mode précédent, et ils résistent bien à l'effort considérable de compression auquel ils sont soumis. Quand on veut décintrer, on pratique une ouverture à l'extrémité de chacun des

sacs, lesquels se vident alors lentement, et on peut activer l'écoulement du sable en le remuant avec une tige de bois ou de fer. Ce moyen, simple et économique, fournit un décintrement facile, excessivement régulier, sans aucune secousse.

Aujourd'hui on remplace souvent les sacs par des boîtes (636).

M. Dupuit, inspecteur des ponts et chaussées, et M. Meyer ont fait usage, pour décintrer les 14 arches des Ponts-de-Cé, de verrins placés à côté des coins. Ayant tourné l'écrou de manière à soulever le cintre, on chasse avec facilité les coins, et le cintre ne reposant plus que sur les verrins, il est descendu d'un mouvement qu'on peut maîtriser complétement depuis le commencement jusqu'à la fin de l'opération. L'écrou est fileté à droite sur la moitié de sa longueur et à gauche sur l'autre moitié, et dans chacune de ces moitiés pénètre une vis à filets carrés de $0^m,055$ de diamètre intérieur et de $0^m,045$ à l'intérieur des filets. En tournant l'écrou, les deux vis y pénètrent simultanément, ou elles en sortent; la course est de $0^m,08$ pour chaque vis. Les 12 verrins employés ont coûté 903 fr. Les arches avaient 25 mètres d'ouverture, et MM. Dupuit et Meyer pensent que les verrins employés sont assez puissants pour être appliqués à des arches de la plus grande portée.

635. *Reconstruction du pont Notre-Dame, à Paris.* Cette reconstruction, qui s'est faite en quelques mois, a fixé l'attention de tout Paris et principalement des connaisseurs, tant par le mode que par la rapidité d'exécution; aussi fait-elle honneur aux ingénieurs MM. Michal et Darcel, ainsi qu'au constructeur M. Gariel.

Nous avons déjà exposé le mode de construction de la voûte de ce pont (634). Pour tracer le profil des voûtes qui a servi à découper les panneaux en volige nécessaires à la taille des voussoirs, on a tracé les ellipses d'intrados et d'extrados à l'aide d'une grande règle sur l'une des arêtes de laquelle, à partir d'un même point, on a porté le petit et le grand axe (*Int.*, 1067). Les axes des ellipses d'extrados et d'intrados coïncident; mais comme la longueur du grand axe de l'ellipse d'intrados n'était pas donnée, pour l'obtenir, du point fixé comme naissance de l'arc d'extrados, comme centre, avec un rayon égal au petit axe, on a décrit un arc de cercle coupant le grand axe en un point; on a joint par une droite ce point à celui de naissance de l'extrados, et la longueur de cette droite prolongée jusqu'à sa rencontre avec le petit axe a été la longueur du grand axe. Ayant les axes des ellipses, on a déterminé les foyers (*Int.*, 1052).

On a pris pour directions des plans de joints des moyennes entre les normales aux courbes d'intrados et d'extrados, moyennes que l'on a obtenues assez exactement pour la pratique en menant les rayons vecteurs de l'ellipse d'intrados à des foyers fictifs également distants des foyers d'intrados et d'extrados, et en menant les bissectrices des angles formés par ces rayons vecteurs (*Int.*, 1071).

*Ce qui suit est extrait du cahier des charges :*

*Dimensions.* Le pont sera formé de 5 arches ayant 18m,76 de largeur sur 7m,50 de flèche pour celle du milieu, 18m,20 de largeur sur 7m,39 de flèche pour les voisines, et 17m,67 de largeur sur 7m,28 de flèche pour les arches extrêmes; de telle sorte que les naissances étant à 2 mètres en contre-haut de l'étiage amont du pont, fixé à la cote 75m,45, les clefs seront établies sur deux lignes inclinées à 0m,005 pour mètre à partir de celle de l'arche du milieu.

Chaque voûte aura 0m,90 d'épaisseur à la clef, et ira en s'élargissant de manière à avoir 1m,40 d'épaisseur à la rencontre de l'extrados avec le plan d'arasement des maçonneries de remplissage des piles, établi à la cote 68m,25.

L'extrados sera revêtu d'une chape en ciment, recouverte d'une seconde en bitume, dans laquelle seront pris des tuyaux pour dégorger les eaux qui pourront s'infiltrer à travers la chaussée.

Les piles auront 3m,50 d'épaisseur aux naissances et un fruit de 1/35. Les becs seront demi-circulaires.

Les têtes des voûtes feront une saillie de 0m,05 sur les parements des tympans; chaque assise sera marquée par des refends de 0m,05 de largeur et autant de profondeur; il en sera de même des maçonneries de pierre de taille des becs. Les maçonneries des têtes formeront également une saillie de 0m,05 sur la douelle de la voûte, avec laquelle elles se relieront par un appareil de carreaux et boutisses ayant alternativement 0m,80 et 1m,10 de longueur.

Les tympans, de 1 mètre d'épaisseur, seront arasés suivant les lignes formées par le sommet de l'extrados des voûtes; ils présenteront au-dessus de chaque pile un pilastre formant saillie de 0m,15 sur le parement général.

Les parapets auront 0m,80 de hauteur extérieurement, et 1 mètre de côté des trottoirs; leur épaisseur sera de 0m,50; ils seront posés à l'aplomb des tympans.

L'axe de la chaussée suivra, à partir de l'axe des quais de la rive droite, placés à la cote 64m,70, une rampe de 0m,005 par mètre, jusqu'au sommet de l'arche du milieu; de ce point, il s'abaissera par une pente également de 0m,005 par mètre jusqu'aux quais de la rive gauche.

Le profil en travers présentera une chaussée de 12 mètres de largeur, bombée au 1/80, et bordée de deux trottoirs de 5 mètres de largeur, ayant une pente de 0m,03 par mètre dirigée du côté de la chaussée. Ils seront terminés par une bordure formant saillie de 0m,15 sur cette dernière. La chaussée aura 0m,30 d'épaisseur.

Il y aura deux galeries sous chaque trottoir pour le passage des conduites d'eau et de gaz; elles auront chacune 1 mètre de hauteur sous le dallage de 0m,15 d'épaisseur, et 1m,20 de largeur. Ces galeries présenteront les mêmes pentes que la chaussée; elles seront prises en partie dans l'épaisseur des voûtes.

*Matériaux.* Les avant-becs, les têtes des voûtes, les corniches et les parapets seront en maçonnerie de pierre de taille de Bourgogne; les pilastres des tympans, en pierre de taille de Vergelet; les douelles des voûtes, en moellon piqué de roche hourdé en mortier de ciment; les tympans, en moellon piqué de roche et mortier de chaux hydraulique; la maçonnerie de remplissage des voûtes, en moellon hourdé en mortier de ciment; la maçonnerie de remplissage des tympans et celles des galeries de conduites, en moellon et mortier de chaux hydraulique; les remplissages entre les voûtes et la chaussée, en maçonnerie de pierre sèche. Les trottoirs seront en dalles de granit, avec bordure également en granit.

*Cintres.* Les cintres en charpente devront servir à la démolition et à la reconstruction; ils seront composés, pour chaque arche, de 13 fermes espacées de 2 mètres d'axe en axe pour les 11 du milieu, et de 1m,25 pour les deux têtes, de manière à obtenir une largeur totale de 22m,75 entre les faces des deux fermes de tête.

Chaque ferme sera formée de deux systèmes de courbes, dont le cours supérieur sera, pour la démolition, parallèle à l'intrados des voûtes et distant de 0m,20 de ce dernier, de manière qu'on puisse facilement introduire les couchis de 0m,12 d'équarrissage, et les serrer fortement au moyen de coins contre les maçonneries des voûtes. Le cours

inférieur des courbes sera au contraire parallèle à la douelle des nouvelles voûtes, et il en sera distant de 0m,12 pour les 9 fermes du milieu, et de 0m,17 pour les deux d'amont et les deux d'aval. La maçonnerie en pierre de taille des têtes, et celle en moellon piqué des voûtes, en retraite de 0m,05 sur la première, s'appuieront ainsi directement sur les couchis de 0m,12 d'équarrissage et espacés de 0m,12. Il y aura trois cours de couchis : 1° ceux s'appuyant sur les deux fermes de tête amont; 2° ceux supportés par les 11 fermes du milieu; ceux-ci passeront, sur la deuxième ferme, dans les interstices laissés par les couchis du 1er cours, et seront maintenus au moyen de cales de 0m,05 d'épaisseur sur la courbe de la 2e ferme; 3° ceux des deux fermes aval, disposés symétriquement comme ceux des deux fermes amont.

Les courbes seront supportées, pour les 4 arches du côté de la rive droite, par un système de charpente de cintre, dit fixe, établi à deux étages, de manière à pouvoir décintrer les arches, lors même que les eaux seraient élevées. Ces cintres s'appuieront sur trois palées, l'une établie dans l'axe de l'arche, et les deux autres sur les crèches des piles. Le cintre de l'arche de la rive gauche sera retroussé de manière à entraver le moins possible la navigation.

*Lieux d'extraction, qualités et préparation des matériaux.*

1° La *pierre de taille* à employer proviendra en partie des démolitions du pont actuel; il ne sera employé de pierre de taille neuve qu'autant que toute la vieille pierre bonne à réemployer en assises aura été utilisée.

La pierre de taille neuve sera de la qualité dite de roche (548), et proviendra, suivant les indications données à l'entrepreneur, des meilleurs bancs des carrières de Bagneux, près Paris, du banc gris de la carrière de Pierrechèvre, près Châtillon-sur-Seine, et du banc jaune de la carrière de Chevroche, près Clamecy. Elle sera sans veines, fils, moies ni bousin; les arêtes seront vives, dressées avec le plus grand soin, sans épaufrures ni écornures.

Tous les lits et joints devront se retourner bien francs, sans démaigrissement sur les longueur et largeur assignées à chaque pierre; ils seront d'équerre ou suivant l'angle assigné sur les paremens, dégauchis et taillés sur toute leur étendue.

Le parement vu sera layé avec le plus grand soin entre ciselures de 0m,015 pour la pierre de Bagneux, et bouchardé à la fine boucharde entre ciselures de 0m,015 pour la pierre de Bourgogne.

Chaque pierre, pour assise du bahut, du parapet ou pour le cordon, aura au moins 1m,50 de longueur; les pierres pour le parpaing auront 1m,30; les claveaux des voûtes seront d'une seule pierre, les lits correspondant aux refends; les carreaux et boutisses des chaînes seront également d'une seule pierre.

2° Les *granits* proviendront des carrières les plus dures de la Normandie et de la Bretagne, à l'exclusion de celles de Bourgogne et du Nivernais (520). Ils seront à grains fins bien adhérents, et devront peser au moins 2700 kilog. le mètre cube. Aucun bloc ne devra contenir de fentes, ni de parties tendres et rouillées.

Les paremens seront parfaitement dressés à la fine pointe, entre ciselures de 0m,015 aux arêtes; ces arêtes seront droites sans écornures. Chaque bordure des trottoirs aura au moins 1m,30 de longueur. La largeur des dalles variera de 0m,50 à 0m,60.

3° Le *moellon* proviendra en partie des démolitions, ou du cassage de la vieille pierre de taille ne pouvant être utilisée comme assise (556).

Le moellon neuf à employer sera de roche, et proviendra des carrières de Vaugirard ou des environs; il sera dur, rocailleux et parfaitement ébousiné; chaque moellon ne pourra avoir moins de 0m,25 dans sa plus petite dimension.

4° Les *moellons piqués* proviendront du cassage de la pierre de taille de démolition (556). Chaque morceau sera taillé sur appareil régulier, de manière que deux assises de moellon correspondent à une de pierre de taille. Chaque morceau aura au moins 0m,60 de longueur, et la queue variera de 0m,40 à 0m,60, de manière à former une queue moyenne de 0m,50.

Les paremens seront taillés à la grosse brettelure entre ciselures de 0m,015. Les joints retourneront normalement, et les lits sur l'inclinaison assignée; ils seront taillés

sans démaigrissement, avec les mêmes soins que pour la pierre de taille, sur 0m,25 de longueur.

5° La *meulière* sera de deux natures (520 et 557); celle pour parements de quais à reconstruire proviendra de Buch; celle pour maçonnerie de remplissage et parements d'égouts proviendra de Villeneuve-Saint-Georges, Corbeil et autres localités de la haute Seine.

La meulière de Buch, piquée en carrière, sera taillée sur le chantier avec les mêmes soins que la pierre de taille. Les lits et joints étant bien dressés et retournés d'équerre sur 0m,15 au moins de longueur, les arêtes seront parfaitement droites et vives sans écornures. Les pierres auront au moins 0m,16 de hauteur, 0m,20 de queue et 0m,25 de longueur; la queue moyenne devra être de 0m,30.

La meulière de la haute Seine à employer en parement dans les égouts sera dégrossie à la grosse pointe et parfaitement smillée, les lits et joints étant dressés et retournés d'équerre sur au moins 0m,12 de longueur. Chaque pierre aura au moins 0m,10 de hauteur d'assise et 0m,25 de queue.

6° Le *sable* sera sec et anguleux (541), criant à la main, sans mélange de vase ou gravier. Il proviendra de dragages faits en Seine; celui devant servir à la pose de la pierre de taille sera en outre tamisé avec soin.

7° Il ne pourra être employé que de la *chaux* hydraulique artificielle *dite de Paris* (533). L'hydrate déposé sous l'eau devra supporter l'aiguille Vicat au bout de 9 jours (page 699).

La chaux, déposée vive sur les chantiers, sera éteinte dans des bassins ayant au plus 0m,50 de hauteur; on n'emploiera, pour l'extinction, que la quantité d'eau nécessaire pour la réduire en pâte ferme et consistante; elle sera éteinte au moins 48 heures avant la fabrication des mortiers. Les hydrates qui auraient durci avant leur emploi, ou qui contiendraient des parties lentes, mal éteintes, ou des incuits, seront rejetés.

8° Le *mortier* sera composé de 0m,33 de chaux en pâte pour 1 mètre de sable (541). Le dosage se fera dans les bassins d'extinction, de forme rectangulaire à plancher horizontal, ou par toute autre méthode prescrite par l'ingénieur.

Le mortier sera fabriqué à force de bras, avec des rabots. On commencera par réduire, sans addition d'eau, la chaux en bouillie par la macération; on incorporera ensuite le sable par parties, et le mélange sera brassé jusqu'à ce que la pâte soit liante et ductile.

Le mortier sera employé immédiatement après sa fabrication; celui qui aurait durci sur l'aire serait rejeté.

9° Le *béton* sera composé de 3 parties de mortier pour 5 parties de pierres cassées ou de gravier (545); chaque pierre devra passer au travers d'un anneau de 0m,06 de diamètre, et avoir plus de 0m,02 dans sa petite dimension; les pierrailles seront lavées avant leur emploi.

10° Le *ciment* proviendra des usines de Vassy (540). Il sera ou conservé dans des futailles à l'abri de la pluie et de l'humidité, ou en tas sous des hangars clos très-hermétiquement. Dans ce dernier cas, le ciment arrivera directement de l'usine par chemin de fer, dans des sacs en toile.

Le ciment ne sera incorporé aux mortiers et bétons qu'après le complet corroyage de ces derniers et au moment de l'emploi.

Le mortier de ciment sera composé suivant les indications de la série des prix. Le dosage des parties composantes se fera au volume. Le mortier sera gâché dans des auges, par parties et avec la plus petite quantité d'eau possible. Celui qui s'échaufferait avant l'emploi sera rejeté.

11° Tous les *bois en charpente pour fondations* seront en chêne neuf de premier choix, sans pourriture ni nœuds vicieux; ils ne seront point échauffés, gras, gélifs, ni tranchés dans leurs fils.

Les pieux seront en grume ou carrés, suivant les ordres qui seront donnés à l'entrepreneur; ils seront parfaitement droits, et ne pourront avoir de flache de plus de 0m,10, mesurée sur le pan coupé s'ils sont carrés; s'ils sont ronds, ils seront dégarnis

de leur écorce, et les nœuds seront proprement coupés à la cognée. L'équarrissage moyen des pieux ne pourra dépasser les dimensions indiquées à l'entrepreneur; mais il sera toléré sur chaque pieu 3 centimètres en plus ou en moins desdites dimensions.

Les pieux seront armés d'un sabot en fer fixé avec des clous, et ils seront disposés pour recevoir une frette en fer.

Les palplanches, comme les pieux, seront d'un bout appointées et armées d'un sabot en fer, et de l'autre disposées pour recevoir une frette; leurs bords seront flaches et dressés à la bisaigue. La différence de largeur d'une même palplanche, à ses deux extrémités, ne pourra excéder 3 centimètres.

Les moises, ventrières, chapeaux ou longrines de plancher ne seront pas refaites sur les faces : cependant elles seront parfaitement droites et équarries, et il ne sera souffert aucune flache de plus de $0^m,05$, mesurée sur le pan coupé. Chaque pièce de bois devra relier au moins trois pieux, et ne pourra s'assembler à la suivante dans l'intervalle; les joints de deux pièces voisines ne pourront correspondre au même pieu.

Les *bois pour charpentes provisoires* seront en chêne ou en sapin, suivant les ordres donnés à l'entrepreneur. Ils seront parfaitement travaillés et ne pourront avoir de flaches de plus de $0^m,05$, mesurées sur le pan coupé. Les chapeaux, les moises et les contre-fiches seront d'une seule pièce dans toute leur longueur.

12° La *fonte* sera douce, grise et parfaitement moulée, sans soufflures ni fontes de retrait.

Le *fer* sera de qualité dite de roche; il ne sera ni aigre ni cassant, mais nerveux et malléable; il sera travaillé sans brûlures, pailles ni gerçures.

13° Le *bitume* des chapes et trottoirs sera composé de roche calcaire asphaltique de Seyssel ou de Val-de-Travers (*Art.* 71), réduite en poudre par une demi-calcination, et de mastic ou goudron minéral de Bastennes ou de Lobsann. Ces matières seront composées, pour les chapes, d'une partie de sable de rivière passé à la claie et de trois parties de matières asphaltiques, et pour les trottoirs, de trois parties de mastic pour deux de sable.

Dans le bitume en réfection, l'entrepreneur ajoutera les matières qu'exigera le réemploi des vieux enduits.

Les chapes auront $0^m,012$ d'épaisseur et les trottoirs $0^m,015$.

## 636. Ponts d'Austerlitz, des Invalides et de l'Alma, à Paris (page 723).

1° *Pont d'Austerlitz.* On a remplacé les anciens arceaux en fonte par des voûtes en maçonneries, mais on a conservé les anciennes piles, en les allongeant de manière à porter la longueur des arches à 17 mètres entre les têtes. Ce qui suit est extrait du cahier des charges (on a supprimé ce qui ne serait que la répétition de ce qui a déjà été dit au numéro précédent).

Les *piles* seront allongées à chaque extrémité, de manière à pouvoir recevoir franchement des arches; elles seront terminées par des avant et arrière-becs circulaires de $1^m,50$ de rayon. Les allongements seront établis sur les empatements des piles.

L'épaisseur actuelle 8 mètres des *culées* sera portée à 13 mètres; la maçonnerie de meulière et ciment reposera sur un grillage soutenu par des pieux de 5 mètres de longueur espacés de 1 mètre d'axe en axe.

L'ouverture de chacune des 5 *arches* est de $32^m,50$, et la flèche variera entre le 1/8 et les 10/66 de l'ouverture. Les naissances seront placées à $5^m,40$ au-dessus de l'étiage.

Chaque arche sera formée d'une voûte en maçonnerie de meulière et ciment de Vassy de $1^m,20$ d'épaisseur uniforme terminée aux têtes par un appareil en pierre de taille de Bourgogne ayant $1^m,20$ à la clef, 2 mètres aux naissances et 1 mètre de queue moyenne.

Ces têtes, de 69 voussoirs de $0^m,50$ en douelle, feront saillie de $0^m,05$ sur les parements des tympans, et seront à joints refouillés de $0^m,05$ de largeur et $0^m,05$ de pro-

fondeur. En douelle, les assises de meulière smillée apparentes se raccorderont avec les voussoirs de tête.

Les *tympans* seront en pierre de taille de Vergelet. A l'intérieur, les maçonneries seront évidées au moyen de voûtes longitudinales ayant $0^m,50$ d'épaisseur uniforme à la clef, $0^m,60$ de pieds-droits et $0^m,90$ à l'intérieur. Il y aura ainsi 6 voûtes, dont 4 sous la chaussée et une sous chaque trottoir.

Toutes les maçonneries des arches seront recouvertes d'une *chape* en ciment de $0^m,03$ d'épaisseur, ainsi que les parois verticales des galeries ménagées pour le service des eaux. Il sera fait un enduit bitumineux de $0^m,013$ d'épaisseur dans toutes les parties destinées à recevoir des eaux.

Les *cintres* pour la reconstruction se composeront de 8 fermes également espacées de $2^m,10$. Chaque ferme reposera sur des palées formées de deux cours de pieux pennelés et sur les retraites des maçonneries des piles; ces fermes seront composées de contre-fiches de $0^m,30$ sur $0^m,30$, réunies par des cours de moises horizontales de $0^m,30$ de hauteur sur $0^m,20$. Les fermes seront reliées entre elles par 20 pièces horizontales de $0^m,30$ sur $0^m,20$.

Les couchis auront au moins $0^m,20$ d'épaisseur; ils seront parfaitement dressés et présenteront une surface cylindrique régulière. Ces couchis seront recouverts, dans la partie faite en meulière, d'une seconde rangée de couchis de $0^m,06$ d'épaisseur, de manière que la douelle soit de $0^m,05$ en retraite sur les têtes en pierre de taille.

Le décintrement s'opérera au moyen de boîtes remplies de sable.

La *pierre de taille* dure sera de la qualité dite de roche; elle proviendra : 1° des carrières de Pierrechèvre, près Châtillon-sur-Seine (banc gris); 2° des carrières de Laversine.

Les *pierres de taille tendres* seront de Vergelet ou de Saint-Leu.

Il ne pourra être employé que de la chaux hydraulique artificielle des Moulineaux.

Le béton durci avant son emploi sera rejeté.

Le ciment pour enduit de parements vus proviendra de Vassy. Le ciment de Pouilly, portant la marque *Lacordaire et Mantion*, pourra être employé pour maçonnerie.

2° *Pont des Invalides*, remplaçant l'ancien pont suspendu.

Le pont sera formé de 4 arches ayant, celles de rives, $31^m,90$ d'ouverture sur $3^m,40$ de flèche, et les deux du milieu $31^m,63$ d'ouverture sur $4^m,20$ de flèche; de telle sorte que les naissances étant à $5^m,10$ au-dessus de l'étiage, c'est-à-dire à la cote $71^m,50$ du nivellement général de Paris, les clefs des arches seront établies suivant deux lignes inclinées à $0^m,022$ par mètre.

Les voûtes, de 14 mètres de longueur, auront $1^m,20$ à la clef et leur épaisseur ira en augmentant jusqu'aux naissances, où elle sera de $1^m,80$. Elles seront recouvertes d'une chape en ciment de $0^m,03$ d'épaisseur, dans laquelle seront engagés des tuyaux pour dégorger les eaux qui pourraient s'infiltrer à travers la chaussée.

On fera servir les deux anciennes piles. La pile neuve sera fondée sur six rangées de pieux espacés de $1^m,20$ d'axe en axe. Deux autres piles les entoureront à la distance de $1^m,50$ et formeront crèche. Les interstices laissés entre les pieux seront remplis d'enrochements, depuis $4^m,50$ jusqu'à 2 mètres au-dessous de l'étiage; au-dessus sera un massif de béton de 1 mètre. Les pieux, recépés à la même hauteur, seront surmontés de chapeaux et de longrines ayant ensemble $0^m,38$ d'épaisseur. Sur ce plancher s'appuieront les maçonneries, qui présenteront un double socle, le 1er de $6^m$ de largeur, le second de $5^m,50$ s'élevant à $0^m,08$ au-dessus de l'étiage; à partir de ce point, sera la pile ayant 5 mètres à sa base et $4^m,55$ au sommet.

A partir de chaque extrémité du pont, la chaussée aura une rampe de $0^m,022$ par mètre jusqu'au sommet de la 2e arche, et se raccordera par un arc de parabole avec le sommet de la 3e arche. Le profil en travers présentera une chaussée de 8 mètres de largeur courbée au 80e, ayant $0^m,35$ d'épaisseur au sommet, $0^m,25$ sur les côtés, et bordée de deux trottoirs de 3 mètres de largeur, faisant saillie de $0^m,17$ sur la chaussée et ayant une pente en travers de $0^m,03$ par mètre.

Les cintres seront ceux du pont d'Austerlitz.

3° *Pont de l'Alma*. Le pont est composé de 3 arches; celles des rives ayant $38^m,50$

d'ouverture sur 7m,90 de flèche, et celle du milieu 43 mètres sur 8m,60 de flèche.

La forme des arcs est une ellipse. Le corps des voûtes a 1m,50 à la clef et va en s'élargissant jusqu'à 2 mètres à son intersection avec le plan formant le dessus des piles. Les têtes du pont sont allégées par des voussures engendrées par une ligne s'appuyant sur un arc de cercle tangent à l'ellipse au sommet (cet arc ayant, pour les arches de rives, 38m,88 de corde sur 3m,888 de flèche ; pour l'arche du milieu, 43m,88 de corde sur 4m,80 de flèche), et sur la ligne formant l'intersection du cylindre elliptique de douelle et du plan vertical passant à zéro au sommet, et à 2m,50 en arrière des têtes aux naissances. Cette ligne génératrice reste toujours dans un plan normal à la douelle. Au-dessus de la voussure, la tête du pont a 1m,30 au sommet et 2 mètres aux naissances. La largeur entre les têtes est de 20m,60.

Les divers travaux sont exécutés de la manière suivante :

Les *piles et les culées*, le parement en pierre de taille et mortier de ciment, l'intérieur en maçonnerie de moellons bruts et mortier de ciment ;

Les *cordons des piles et culées, ainsi que les têtes des voûtes et les voussoirs*, en maçonnerie de pierre de taille de Bourgogne et d'Euville (Lorraine), sans que ces deux natures de pierre aient été mélangées sur la même tête, et le tout fiché en mortier de ciment ;

Les *tympans*, les parements en pierre de taille de Vergelet, l'intérieur en maçonnerie de moellons bruts et mortier hydraulique ;

La *corniche et les dés du parapet*, en pierre d'Euville et de Sauvigny ;

Les *voûtes*, en maçonnerie de meulière de la haute Seine et mortier de ciment, la douelle étant en meulière piquée de Buch formant appareil avec les têtes ;

Les *chapes* sont en mortier de ciment ; les voûtes des galeries sous les trottoirs sont en briques et ciment ; elles ont 0m,11 d'épaisseur.

**637.** *Murs de soutenement.* L'épaisseur à donner à ces murs varie selon la poussée des terres à soutenir, poussée qui dépend de l'inclinaison du talus affecté par ces terres lorsqu'elles sont abandonnées à elles-mêmes.

Supposons, figure 32, planche III, que les terres à soutenir aient *ce* pour talus naturel. Supposant que le prisme *bce* soit d'un seul morceau, il se maintiendra en équilibre sans exercer aucune poussée sur le mur *abcd* ; mais si nous considérons un prisme *bcf*, il est évident qu'il exercera contre le mur une poussée due à son poids, et diminuée par le frottement des terres sur le talus *cf* et par la cohésion (cette cohésion peut être considérée comme nulle pour les terres remuées, comme le sont généralement celles que l'on rapporte derrière les murs de soutenement, et nous allons d'abord la supposer telle dans ce qui suit) ; si maintenant nous considérons un prisme très-mince le long du parement *cb*, il est évident qu'il exercera contre le mur une poussée moindre que celle du prisme *bcf*. Il existe donc, entre le prisme qui s'applique sur le talus *ce* et le prisme infiniment mince pris contre le parement *cb*, un prisme qui doit exercer une plus grande poussée que tous les autres que l'on peut considérer entre ces deux limites.

On prouve facilement, mais par des calculs assez longs et que nous ne pouvons rapporter ici, que le prisme de plus grande poussée est déterminé par la bissectrice de l'angle formé par la verticale *cb* et le talus naturel *ce*.

Supposant l'angle $bcf = \frac{1}{2}\alpha$, le prisme $bcf$ est celui de plus grande poussée, et on a

$$Q = \frac{\delta h^2}{2} \operatorname{tang}^2 \frac{1}{2}\alpha. \qquad (a)$$

$Q$ poussée des terres contre le parement vertical $bc$;
$\delta$ poids du mètre cube de terre;
$h$ hauteur $bc$ des terres derrière le mur;
$\alpha$ angle de la verticale $bc$ avec le talus naturel $ce$.

Dans le cas où le frottement et la cohésion sont nuls, ce qui a lieu pour les liquides, l'angle $\alpha$ est droit, on a $\operatorname{tang} \frac{1}{2}\alpha = 1$, et, par suite,

$$Q = \frac{\delta h^2}{2}.$$

Il s'agit de déterminer le point d'application de la poussée totale Q. Comme on démontre que cette poussée totale sur le parement du mur peut être représentée par la surface d'un triangle dont la hauteur est $h$, et dont la base et les parallèles à cette base représentent les pressions au pied du mur et sur les divers points respectifs de la hauteur de son parement, il en résulte que la résultante Q de toutes les pressions est appliquée au centre de gravité du triangle, c'est-à-dire à 1/3 de $h$ à partir du pied $c$ du mur (*Int.*, 1444).

Il y aura équilibre statique quand le moment de la force Q, pris par rapport à l'arête extérieure du mur, sera égal au moment du poids du mur, pris par rapport à cette arête, c'est-à-dire quand on aura

$$\frac{\delta h^3}{6} \operatorname{tang}^2 \frac{1}{2}\alpha = \delta' \left[ \frac{nh^2}{2} \times \frac{2nh}{3} + hx \left( nh + \frac{x}{2} \right) + \frac{n'h^2}{2} \left( nh + x + \frac{1}{3} n'h \right) \right]; \qquad (b)$$

équation du second degré qui donne la valeur de $x$, laquelle est, en simplifiant,

$$x = h \left[ -\left( n + \frac{n'}{2} \right) \pm \sqrt{\frac{\delta}{3\delta'} \operatorname{tang}^2 \frac{1}{2}\alpha + \frac{n^2}{3} - \frac{n'^2}{12}} \right]$$

$\delta'$ poids du mètre cube de maçonnerie;
$n$ fruit du parement extérieur par mètre de hauteur du mur;
$\delta' \frac{nh^2}{2} \times \frac{2nh}{3}$ moment du massif formant le fruit du parement extérieur;
$x$ largeur du mur à sa partie supérieure;
$\delta' hx \left( nh + \frac{x}{2} \right)$ moment du massif de mur compris entre ceux qui forment les fruits;
$n'$ fruit, par mètre, du parement intérieur du mur;
$\delta' \frac{n'h^2}{2} \left( nh + x + \frac{1}{3} n'h \right)$ moment du massif de maçonnerie formant le fruit du parement intérieur.

Nous avons négligé le prisme de terre compris entre le parement intérieur et la verticale passant par le pied du mur; mais comme le parement intérieur se fait par retraites horizontales, ce prisme de terre ajoute, par son poids, à la stabilité du mur au lieu d'y nuire.

Lorsque les parements du mur sont verticaux, les valeurs de $n$ et $n'$ sont nulles, et la formule précédente devient

$$x = h \operatorname{tang} \frac{1}{2} \alpha \sqrt{\frac{\delta}{3\delta'}}.$$

Lorsque le mur résiste à un fluide, on a $\operatorname{tang} \frac{1}{2} \alpha = 1$, et, par suite,

$$x = h \sqrt{\frac{\delta}{3\delta'}}.$$

Si le prisme de plus grande poussée était chargé d'un cavalier, à $\frac{\delta h^2}{2}$ il faudrait ajouter $ph$ dans la valeur de Q ($p$ poids du cavalier sur l'unité de surface du terrain), de sorte que le moment de cette poussée deviendrait

$$\frac{h^2}{6} \operatorname{tang}^2 \frac{1}{2} \alpha (\delta h + 2p),$$

et la formule ($b$) donnerait

$$x = h \left[ -\left(n + \frac{n'}{2}\right) \pm \sqrt{\frac{\operatorname{tang}^2 \frac{1}{2} \alpha}{3\delta'} \left(\delta + \frac{2p}{h}\right) + \frac{n^2}{3} - \frac{n'^2}{12}} \right].$$

Le mur doit pouvoir résister non-seulement au renversement, mais aussi au glissement sur sa base; il faut donc que la poussée Q des terres soit moindre que le frottement de glissement augmenté de la cohésion entre le mur et sa base, et que par conséquent, pour l'équilibre statique, on ait

$$\frac{\delta h^2}{2} \operatorname{tang}^2 \frac{1}{2} \alpha = k\delta' \left(\frac{nh^2}{2} + hx + \frac{n'h^2}{2}\right) + c(nh + x + n'h),$$

d'où l'on tire

$$x = \frac{h^2}{2} \times \frac{\delta \operatorname{tang}^2 \frac{1}{2} \alpha - (n + n') \left(k\delta' + \frac{2c}{h}\right)}{k\delta' h + c}.$$

Les valeurs de $\delta$ et de $\delta'$ sont données au n° 46;

Quant à la valeur de l'angle $\alpha$, sous lequel les terres coulantes s'éboulent, il convient de la déterminer directement, en creusant la terre. Pour le sable fin très-sec, on a $\alpha = 60°$; pour la terre sèche et pulvérisée, $\alpha = 46°,50$; pour la terre humectée, $\alpha = 54°$, et pour les terres les plus fortes et les plus denses, $\alpha = 35°$;

$k$ coefficient du frottement du mur sur sa base. Si le mur est établi sur une couche

de béton, on a $k = 0{,}76$; s'il repose sur le sol naturel (terre ou sable), $k = 0{,}57$ d'après des observations de M. Mary; sur un rocher, on aurait, comme pour la maçonnerie, $k = 0{,}76$; pour un fond argileux sujet à être détrempé, on ferait $k = 0{,}30$ environ;

$c$ cohésion du mur sur sa base par mètre carré de cette base. Si le mur repose sur béton, $c = 10\,000$ à $144\,000$, selon que le mortier employé est de médiocre ou d'excellente qualité; la maçonnerie n'ayant aucune cohésion avec un sol de terre ou de sable, on doit faire $c = 0$ dans la formule quand le mur repose directement sur le sol.

Quand le mur descend au-dessous du sol sur les deux faces, comme cela a généralement lieu, on conçoit que la butée des terres contre la seconde face s'oppose au renversement et au glissement. On calculera cette butée à l'aide de la formule (*a*), dans laquelle on remplacera la hauteur $h$, comptée depuis le pied de la fondation, par la profondeur $h_1$ de la fondation, et la différence entre les valeurs des moments de Q et Q′, pris par rapport au pied de la fondation du mur, formera le premier membre de la formule (*b*), qui fournira encore l'épaisseur $x$. Le frottement du mur sur sa base devra encore être supérieur à $Q - Q'$. Il y aurait lieu encore de tenir compte du frottement des terres, frottement qui s'ajoute à Q′ pour s'opposer au mouvement du mur (641).

Quand les terres ont de la cohésion, la valeur de la poussée horizontale est

$$Q = \frac{\delta h}{2} \operatorname{tang}^2 \frac{1}{2} \alpha (h - h').$$

$h'$ profondeur à laquelle on a creusé les terres à pic avant leur éboulement, la surface des terres ayant été dressée horizontalement.

On déterminerait l'épaisseur à donner au mur pour résister à cette valeur de Q, de la même manière que quand la cohésion est nulle; il suffirait de remplacer dans les formules précédentes la valeur de Q (formule (*a*), par cette nouvelle.

Toutes les formules précédentes fournissent l'épaisseur à donner au mur pour qu'il y ait équilibre statique; mais il est évident que cette épaisseur ne suffit pas dans la pratique, et qu'on doit l'augmenter, pour obtenir une stabilité convenable, d'une quantité qui dépend de la nature de la fondation sur laquelle repose le mur; car l'arête autour de laquelle le mur tend à tourner s'enfonce avec d'autant moins de peine, et le renversement est d'autant plus facile, que la fondation est plus compressible. Il conviendrait, par des observations sur les constructions existantes, ou par des expériences directes, de déterminer le coefficient par lequel il faut multiplier le moment d'équilibre statique du mur, pour avoir une stabilité convenable pour chaque nature de fondation. D'après Gauthey, les dimensions calculées à l'aide des formules précédentes, où on a fait abstraction de la cohésion des terres, peuvent être adoptées avec confiance dans la pratique, surtout si l'on

exécute les remblais derrière les murs à mesure qu'on les élève, afin de donner aux terres le temps de se tasser et d'adhérer entre elles. Mais ces formules supposent que la base sur laquelle le mur est élevé est incompressible, et comme le défaut de soin et de précaution dans la fondation est une des causes les plus fréquentes de la destruction des murs de revêtement, et que la moindre inégalité dans le tassement peut faire sortir le mur de son aplomb, il convient presque toujours d ajouter quelque chose à l'épaisseur donnée par les formules, et d'avoir égard à la nature de la fondation et à son degré de compressibilité pour fixer la largeur de l'empatement sur lequel le mur est établi.

Lorsque le mur est établi sur un sol très-mauvais, il convient que le moment de stabilité du mur, pris par rapport à la ligne passant par le milieu de la base du mur, fasse équilibre au moment de la poussée des terres; car alors le mur pressant également en tous les points de sa base, le tassement est aussi uniforme que possible; on obtient cette disposition en donnant un grand fruit au parement extérieur.

Pour apprécier, en général, l'augmentation à donner à un mur de soutenement au delà de l'épaisseur statique, M. Mary a imaginé de tracer sur le profil du mur la courbe des pressions, comme on le fait pour les voûtes (629); on voit ainsi en quel point et sous quel angle cette courbe vient couper la fondation. Dans le cas du renversement, on calcule la surépaisseur de manière que la partie de la fondation qui y correspond ne s'affaisse pas ou ne s'écrase pas sous le poids des 2/3 de la charge.

La courbe se détermine en divisant le mur en tranches verticales triangulaires ou rectangulaires, de manière à éviter la recherche des centres de gravité de figures polygonales, et en composant la poussée des terres ou de l'eau avec le poids de la première tranche; cette première résultante se compose elle-même avec le poids de la deuxième tranche, et ainsi de suite.

Afin d'augmenter le moment de stabilité du mur, on construit souvent des contre-forts sur le parement intérieur; ces contre-forts ont encore l'avantage de diviser le prisme de plus grande poussée.

Lorsque les contre-forts font partie du mur, pour déterminer l'épaisseur de ce mur, on calcule isolément le moment de stabilité de la partie de mur qui correspond à un contre fort, en considérant le contre-fort comme faisant partie du mur, et celui de la partie comprise entre deux contre-forts; on ajoute ces deux moments, et on égale leur somme au moment de la poussée calculée pour la longueur de prisme correspondant à l'intervalle compris entre deux contre-forts.

Lorsque l'on fait des contre-forts indépendants, comme ceux en pierre sèche, on calcule le moment de stabilité comme dans le cas précédent, mais sans avoir égard aux contre-forts, et on l'égale au moment de la poussée pris pour l'intervalle renfermé entre deux contre-forts.

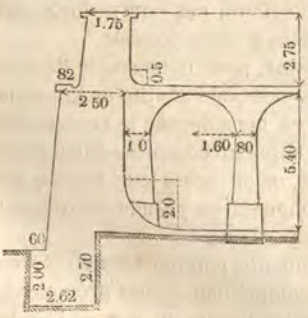
Pour que ce mode de calcul soit exact, les contre-forts doivent être assez longs pour atteindre la limite du prisme de plus grande poussée; dans le cas contraire, on tiendrait compte de la poussée produite contre le contre-fort par la portion non atteinte de ce prisme.

Les contre-forts isolés n'ayant pour objet que de rompre le prisme de plus grande poussée, ils sont ordinairement employés dans les lieux où la pierre est très-abondante, et on les exécute en pierres sèches. C'est ce qui a été fait très-judicieusement dans diverses circonstances sur le chemin de Saint-Germain, où l'on avait en abondance des mauvais moellons provenant des déblais et ne pouvant servir qu'à faire des remblais et des contre-forts abrités de la gelée.

Le mur de quai de Châlons, construit par Gauthey, a 5 à 6 mètres de hauteur; il a $0^m,65$ d'épaisseur en haut et $1^m,15$ en bas, avec 1/12 de fruit sur le parement vu. Les contre-forts ont 1 mètre d'épaisseur et autant de saillie; ils sont distants de $5^m,30$ d'axe en axe; ils sont reliés par 3 étages de voûtes en décharge de $1^m,60$ de hauteur sous clef. Par cette disposition on a économisé 1/3 de la maçonnerie.

Dans les quais de Paris, on a rattaché aux murs des contre-forts distants de 6 mètres, ayant $2^m,20$ de longueur et $1^m,20$ à $1^m,50$ de largeur. Ils supportent des trottoirs qui ont 3 mètres; le parapet a $0^m,50$; mais on ne les a reliés que par une seule voûte placée à la partie supérieure. Cette disposition exige plus de maçonnerie que celle de Gauthey; mais elle diminue les frais de construction de voûtes. Un motif indépendant de l'économie aurait dû engager à adopter ce système, c'est la facilité qu'il présente d'établir solidement les trottoirs sur les voûtes en décharge. Sur plusieurs quais de Paris, établis dans un autre système, il y a pendant longtemps des tassements dans les terres rapportées derrière les murs; de sorte que si l'on y établissait des trottoirs ils seraient continuellement dégradés pendant un grand nombre d'années par l'effet du tassement (*Art.* 214).

Fig. 90.




*Profil des murs des bassins de Passy* (*fig.* 90 à l'échelle de $\frac{1}{300}$). Un bassin de $2^m,75$ de profondeur est découvert et a pour fond une série de voûtes d'arêtes formant le ciel d'un autre bassin de $5^m,40$ sous clef. La capacité de ces deux bassins réunis est de 18 000 mèt. cubes. A côté se trouve un même système de bassins d'une égale capacité, puis un autre bassin découvert pouvant contenir 4 000 mètres cubes d'eau. La contenance totale des 5 bassins est ainsi de 40 000 mètres cubes environ. Les réservoirs découverts alimenteront le

bois de Boulogne, et ceux couverts seront destinés à envoyer une eau plus potable dans Paris.

| | |
|---|---|
| Épaisseur à la clef des voûtes d'arêtes en plein cintre formant le fond du réservoir supérieur. . . . . | 0m,33 |
| Distance d'axe en axe des piliers supportant les voûtes d'arêtes. . . . . | 4 ,00 |
| Côté des piliers au niveau des naissances des voûtes d'arêtes. . . . . | 0 ,80 |
| *Id.* *id.* des dés. . . . . | 1 ,00 |
| Hauteur des dés. . . . . | 1 ,00 |
| Côté des dés en haut 1m,20, au pied. . . . . | 1 ,30 |
| Saillie des pilastres accolés aux murs, en regard des piliers, au niveau des naissances des voûtes d'arêtes. . . . . | 1 ,00 |
| Épaisseur du radier, qui repose directement sur le sol, qui est très-solide. . . . . | 0 ,30 |
| Profondeur des fondations des piliers au-dessous de la face supérieure du radier. . . . . | 0 ,50 |

Aucune terre ne s'appuie contre les murs, dont les parements intérieurs sont verticaux, tandis que ceux extérieurs ont un fruit de 1/10. Le fond supérieur se raccorde avec le parement vertical par un congé de 0m,50 de rayon, et le fond inférieur par un congé de 2m,00 de rayon.

Afin d'augmenter le moment de résistance du mur total, le parement de la partie supérieure est en porte-à-faux de 0m,23 sur le parement de la partie inférieure. C'est pour la même raison que la fondation a été reculée; on a du reste proportionné sa largeur à la pression qu'elle supporte.

Tous les parements sont en meulière et le reste en moellons, le tout hourdé en mortier de chaux hydraulique. Les parties en contact avec l'eau seront couvertes d'un enduit en ciment de Vassy, de 0m,03 d'épaisseur moyenne.

638. *Murs de revêtement.* D'après Vauban, les profils des murs de rempart sont convenables lorsque le moment de la résistance est des 4/5 plus fort que celui de la poussée des terres. C'est pour cette résistance que M. Poncelet a donné la formule empirique suivante pour calculer l'épaisseur des revêtements pleins à parements verticaux,

$$x = 0{,}845\ (\mathrm{H} + h)\ \mathrm{tang}\,\frac{1}{2}\alpha\sqrt{\frac{\delta}{\delta'}},$$

qui devient, pour le cas des maçonneries moyennes,

$$x = 0{,}285\ (\mathrm{H} + h).$$

$x$ épaisseur du mur;
H hauteur du revêtement;
$h$ hauteur entière de la surcharge;
$\alpha$ angle du talus naturel des terres avec la verticale (637);
$\delta$ poids du mètre cube de terre;
$\delta'$ poids du mètre cube de maçonnerie.

Ces formules sont applicables dans les limites de $h = 0$ et $h = H$, qui correspondent aux surcharges ordinaires de la pratique.

Si le parement extérieur, au lieu d'être vertical, avait une inclinaison moindre que 1/6, on prendrait l'épaisseur déduite de la formule précédente pour celle du revêtement cherché, mesurée à 1/9 de la hauteur à partir de la base. Cette règle est fondée sur le principe suivant :

*Principe général de transformation d'un profil en un autre, d'après Vauban.* Tous les profils de revêtements à parement intérieur vertical, de même hauteur et même stabilité, mais dont les parements extérieurs sont inclinés à moins de 1/6 sur la verticale, ont, à 1/120 près, la même épaisseur au 1/9 de leur hauteur à partir de la base; d'où il résulte que jusqu'à cette limite, pour transformer un profil en un autre, il suffit de faire tourner le parement extérieur donné autour d'une horizontale comme axe, jusqu'à ce qu'il ait l'inclinaison voulue, cette horizontale étant tracée dans le parement donné, et au 1/9 de sa hauteur.

Lorsque l'inclinaison du talus extérieur varie de 0 à 1/5, la même égalité a encore lieu, mais seulement à 1/71 près.

*Table donnant les épaisseurs x des revêtements pour les diverses terres et maçonneries, avec ou sans berme, et pour des hauteurs de surcharges qui dépassent les limites ordinaires de la pratique; ces épaisseurs étant calculées en prenant la hauteur* H *des revêtements verticaux pour unité, et dans l'hypothèse de la rotation, et d'une stabilité équivalente à celle du revêtement modèle de Vauban, sans contre-forts.*

Les lettres $x$, H, $h$, $\delta$ et $\delta'$ ont les mêmes significations que dans les formules précédentes, et $f = \text{tang}\,\alpha$; $f$ varie de 0,6 à 1,4, suivant que les terres sont légères ou très-fortes, et $f = 1$ pour les terres moyennes pour lesquelles $\alpha = 45°$ (637).

| VALEUR de $\frac{h}{H}$ | VALEUR DE $x$ pour $\frac{\delta'}{\delta} = 1$, $f = 0.6$, la berme étant | | VALEUR DE $x$ pour $\frac{\delta'}{\delta} = 1$, $f = 1.4$, la berme étant | | VALEUR DE $x$ pour $\frac{\delta'}{\delta} = 1.5$, $f = 1$, la berme étant | | | VALEUR DE $x$ pour $\frac{\delta'}{\delta} = \frac{5}{3}$, $f = 0.6$, la berme étant | | VALEUR DE $x$ pour $\frac{\delta'}{\delta} = \frac{5}{3}$, $f = 1.4$, la berme étant | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | nulle. | 0.2H | nulle. | 0.2H | nulle. | 0.2H | totale. | nulle. | 0.2H | nulle | 0.2H |
| 0.0 | 0.452 | 0.452 | 0.258 | 0.258 | 0.270 | 0.270 | 0.270 | 0.350 | 0.350 | 0.198 | 0.198 |
| 0.1 | 0.498 | 0.507 | 0.282 | 0 290 | 0.303 | 0.306 | 0.303 | 0.393 | 0.398 | 0.222 | 0.229 |
| 0.2 | 0.548 | 0.563 | 0.309 | 0.326 | 0.336 | 0.342 | 0 326 | 0.439 | 0.445 | 0.249 | 0.262 |
| 0.3 | 0.604 | 0 618 | 0.338 | 0.361 | 0.368 | 0.375 | 0.343 | 0.485 | 0.489 | 0.274 | 0.283 |
| 0 4 | 0.665 | 0.670 | 0.369 | 0.394 | 0.399 | 0.405 | 0 357 | 0.532 | 0.522 | 0.303 | 0.299 |
| 0.5 | 0.726 | 0.717 | 0.402 | 0.423 | 0.436 | 0.431 | 0.368 | 0.579 | 0.549 | 0.332 | 0.314 |
| 0.6 | 0.778 | 0.754 | 0.436 | 0.450 | 0.477 | 0.457 | 0.377 | 0.617 | 0.572 | 0.360 | 0.328 |
| 0.7 | 0.824 | 0.790 | 0.472 | 0.476 | 0.512 | 0.481 | 0 385 | 0.645 | 0.593 | 0.387 | 0.343 |
| 0.8 | 0.867 | 0 820 | 0.510 | 0.501 | 0.544 | 0.504 | 0.391 | 0.668 | 0.610 | 0.413 | 0.357 |
| 0.9 | 0.903 | 0.848 | 0 541 | 0 524 | 0.575 | 0.523 | 0.398 | 0 690 | 0.624 | 0.437 | 0.371 |
| 1.0 | 0.930 | 0 873 | 0.571 | 0.546 | 0 605 | 0.540 | 0.405 | 0.707 | 0.636 | 0.457 | 0.384 |
| 1.2 | 0.983 | 0.916 | 0.632 | 0.586 | 0.654 | 0.574 | 0.411 | 0.737 | 0.655 | 0.498 | 0.410 |
| 1.4 | 1.023 | 0.945 | 0.684 | 0 624 | 0.696 | 0.602 | 0.416 | 0.762 | 0.672 | 0.537 | 0.428 |
| 1.6 | 1.056 | 0.970 | 0.730 | 0.658 | 0.734 | 0.622 | 0.420 | 0.780 | 0.685 | 0.566 | 0.445 |
| 1.8 | 1.084 | 0.990 | 0.772 | 0.690 | 0.769 | 0.640 | 0.423 | 0.797 | 0.697 | 0.594 | 0.461 |
| 2.0 | 1.107 | 1.004 | 0.812 | 0.714 | 0.795 | 0.655 | 0.425 | 0.811 | 0.705 | 0.622 | 0.475 |
| 2.5 | 1.151 | 1.037 | 0.902 | 0.778 | 0.848 | 0.690 | 0.431 | 0.833 | 0.722 | 0.680 | 0.506 |
| 3.0 | 1.180 | 1.060 | 0.981 | 0.835 | 0.892 | 0.717 | 0 435 | 0.852 | 0.731 | 0.726 | 0.531 |
| 3.5 | 1.203 | 1.074 | 1.047 | 0 883 | 0.928 | 0.738 | 0.438 | 0.862 | 0.737 | 0.765 | 0.551 |
| 4.0 | 1.222 | 1.084 | 1.105 | 0.926 | 0.957 | 0.755 | 0.442 | 0.872 | 0.742 | 0.800 | 0.568 |
| 4.5 | 1.237 | 1.093 | 1.158 | 0.962 | 0.981 | 0.768 | 0.444 | 0.878 | 0.747 | 0.833 | 0.583 |
| 5.0 | 1.247 | 1.101 | 1.206 | 0.994 | 1.002 | 0.779 | 0.445 | 0.883 | 0.751 | 0.862 | 0.596 |
| 5.5 | 1.254 | 1.109 | 1.250 | 1.021 | 1.019 | 0.788 | 0.447 | 0.886 | 0.756 | 0.885 | 0.607 |
| 6.0 | 1.259 | 1.116 | 1.290 | 1.047 | 1.034 | 0.796 | 0.448 | 0.891 | 0.759 | 0.903 | 0.617 |
| 7.0 | 1.269 | 1.122 | 1.357 | 1.087 | 1.059 | 0.811 | 0.449 | 0.898 | 0.764 | 0.941 | 0.633 |
| 8.0 | 1.276 | 1.128 | 1.415 | 1.121 | 1.079 | 0.822 | 0.451 | 0.903 | 0.768 | 0.968 | 0.646 |
| 9.0 | 1 280 | 1.133 | 1.465 | 1.153 | 1.095 | 0.830 | 0.452 | 0.906 | 0.770 | 0.992 | 0.657 |
| 10.0 | 1.283 | 1.137 | 1.508 | 1.182 | 1.109 | 0.839 | 0.453 | 0.909 | 0.771 | 1.013 | 0.667 |
| 15.0 | 1.298 | 1.150 | 1.662 | 1.271 | 1.149 | 0.864 | 0.455 | 0.917 | 0.777 | 1.088 | 0.696 |
| 20.0 | 1.309 | 1.156 | 1.757 | 1.327 | 1.171 | 0.878 | 0.456 | 0.922 | 0.780 | 1.129 | 0.712 |
| 25.0 | 1.312 | 1.160 | 1.821 | 1.363 | 1.185 | 0.887 | 0.457 | 0.924 | 0.782 | 1.146 | 0.723 |
| 30.0 | 1.316 | 1.162 | 1.866 | 1.389 | 1.194 | 0.894 | 0.458 | 0.926 | 0.783 | 1.174 | 0.730 |
| Infini. | 1.337 | 1.176 | 2.144 | 1.541 | 1.243 | 0.927 | 0.461 | 0.934 | 0.789 | 1.279 | 0.769 |

*Application.* Quelle doit être l'épaisseur d'un mur de quai de 7 mètres de hauteur, le poids du mètre cube de terre et de maçonnerie étant respectivement 1500 à 2250 kilog., et $\alpha = 45°$, ou $f = \text{tang}\,\alpha = 1$?

Ayant $\frac{h}{H} = \frac{0}{7} = 0$, et $\frac{\delta'}{\delta} = \frac{2250}{1500} = 1{,}5$, le tableau donne $x = 0{,}270$. L'épaisseur du mur en mètres sera alors

$$0{,}270 \times 7 = 1^{m},89.$$

Si les valeurs de $f$ et de $\frac{\delta'}{\delta}$ différaient notablement de celle de la table, on prendrait pour $x$ une valeur proportionnelle entre celles de la table qui correspondent aux nombres les plus rapprochés des données.

**639.** *Épaisseur des batardeaux en maçonnerie.* Cette épaisseur se calcule par une formule semblable à celle qui donne l'épaisseur d'un mur de revêtement (638) ; ainsi on a, en remarquant que dans ce cas $h$ est négatif, et que $\delta = 1000$ kilog.,

$$x = 0{,}845\ (H - h)\ \sqrt{\frac{1000}{\delta'}}.$$

Comme au devant des barrages de rivières et de cours d'eau naturels il peut se former des atterrissements dont la poussée est plus grande que celle de l'eau, il faudrait, dans ce cas, faire $\delta = 1800^{k}$, qui est le poids moyen des terres mouillées (561).

**640.** *Épaisseur des murs en pierres sèches.* On prend ordinairement pour cette épaisseur 1/4 en sus de celle que donneraient les formules précédentes pour un revêtement en maçonnerie de même hauteur et placé dans les mêmes circonstances.

**641.** F étant l'excès de la poussée Q sur le frottement, le tout calculé au niveau du sol, on donne, pour déterminer la profondeur $h_1$ à laquelle il faut descendre la fondation pour résister avec sécurité au glissement, la formule

$$h_1 = 1{,}4\ \text{tang}\,\frac{1}{2}\,\alpha\,\sqrt{\frac{2F}{\delta}}. \qquad (a)$$

$\alpha$ est, comme au n° 637, l'angle de la verticale avec le talus naturel des terres, $\delta$ est le poids du mètre cube de ces terres. Sur un sol de sable argileux, qui est celui où le glissement est surtout à craindre, on aurait environ $\alpha = 60°$, $\delta = 1500$, et 0,30 pour le coefficient de frottement du mur sur le sol.

Cette formule est également applicable aux fondations des batardeaux et des réservoirs.

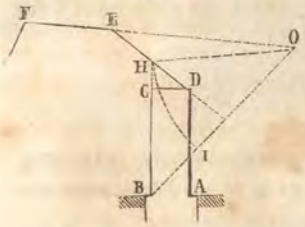
Nous avons vu au n° 637 comment l'on calcule la poussée Q, et le frottement du mur sur sa base ; on a donc le moyen de déterminer F.

Ainsi, ayant calculé l'épaisseur du mur, comme on l'a fait applica-

tion du n° 638, au niveau du sol inférieur, on détermine F; puis la formule précédente ($\alpha$) donne la profondeur $h_1$, à laquelle il faut descendre la fondation.

642. On donne aussi, pour déterminer la poussée Q, le procédé graphique suivant (*fig.* 91) :

Fig. 91.




On abaisse du pied intérieur B du mur une perpendiculaire sur la direction du talus naturel ED des terres, et on la prolonge jusqu'à la rencontre de la plongée FE en O. Déterminant le point de rencontre H de BC avec ED, et prenant OI = OH, on a la poussée

$$Q = \frac{1}{2}\delta \times (BI)^2.$$

## PONTS EN BOIS.

643. *Ponts en charpente.* Ces ponts, lorsqu'ils sont d'une certaine importance, doivent être établis sur piles et culées en pierre; pour une communication de moindre importance, on fait ordinairement les supports en bois, surtout ceux intermédiaires. Cependant, avant de donner la préférence au bois, il faut avoir égard aux interruptions de passage que nécessiteront les réparations plus fréquentes, à la moindre durée du pont, aux difficultés que l'on rencontrera pour fonder les supports en pierre et en bois, à la plus ou moins grande largeur de débouché que l'on obtient suivant que l'on emploie le bois ou la pierre, à la moins grande résistance que les palées présentent aux énormes glaçons que charrient quelques rivières, et aux prix des matériaux employés (644).

Nous ne pouvons entrer dans tous les détails de construction des ponts en bois, dont la forme d'ensemble et les dispositions des diverses pièces de charpente peuvent varier à l'infini. Dans une telle construction, l'ingénieur doit étudier avec soin de quelle manière résistent les différentes pièces, afin d'en bien proportionner les dimensions, et combiner les pièces entre elles de manière à former des ensembles capables de résister à tous les efforts qui peuvent les solliciter dans les diverses directions.

Quand le cours d'eau est sujet aux débâcles, il est indispensable de préserver les palées par une pièce de bois inclinée servant de chapeau à plusieurs pieux, et formant avec eux un ensemble isolé de la palée. Ce chapeau s'élève du dessous du niveau des basses eaux au-dessus de celui des plus hautes; sa surface supérieure est formée de deux plans

inclinés, dont on arme l'intersection par une barre de fer contre laquelle viennent se briser les glaces.

Nous avons vu, page 785, comment on calcule les dimensions des charpentes en arc de cercle. Pour des arcs surbaissés semblables à ceux employés comme travées de ponts, on calculera la section à l'aide des formules suivantes :

1° Arcs dont la section transversale est un rectangle plein dont $b$ et $h$ sont les dimensions horizontales et verticales :

$$bh^2 = \frac{P}{2R}\left(\frac{h}{s} + \frac{s^3 l}{4}\right);$$

2° Arcs dont la section transversale est une ellipse creuse (page 279), dont $b$, $b'$ sont les demi-axes horizontaux, et $h$, $h'$ les demi-axes verticaux :

$$bh^3 - b'h'^3 = \frac{P}{2R}\left(\frac{bh^3 - b'h'^3}{3{,}1416\,(bh - b'h')s} + \frac{s^3 lh}{18{,}849}\right).$$

P et $l$ ont les mêmes significations que page 785, ainsi que R, qui prend encore les valeurs 300 000 et 5 000 000, suivant qu'on fait usage de bois ou de métal.

$s$ est la longueur en mètres de l'arc ayant 1 mètre de rayon et correspondant à l'angle au centre qui correspond à l'arc du pont.

On a respectivement, pour les rapports de la demi-ouverture $c$ de l'arc à sa flèche $f$.

| $\frac{c}{f} =$ | 2 | 3 | 4 | 5 | 10 | 15 | 20 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $s =$ | 0.925 | 0.641 | 0.489 | 0.376 | 0.324 | 0.280 | 0.105 |
| $s^3 =$ | 0,792 | 0.263 | 0.117 | 0.053 | 0.034 | 0.022 | 0.004 |

Le rayon $l$ de l'arc est du reste donné par la formule

$$l = \frac{c^2 + f^2}{2f}.$$

Le tracé de la courbe des pressions éclairera, quant à la stabilité des arcs en bois ou en métal, comme pour la pierre (629).

## PONTS MÉTALLIQUES.

**644.** *Ponts en métal.* Les fermes des ponts peuvent être faites en fer ou en fonte, ou avec ces deux métaux réunis, ou encore avec ces deux métaux combinés séparément ou ensemble avec le bois. Dans ces sortes de fermes, il convient de n'employer la fonte que pour supporter des efforts de pression. Ces fermes métalliques s'établissent sur des piles et culées en pierre, qui doivent s'élever jusqu'au tablier du pont, afin que

les vibrations d'une arche ne se transmettent pas aux autres. Cette précaution doit être prise également pour les ponts en bois.

Les fermes en fonte sont ordinairement en arc de cercle, et composées d'un certain nombre de voussoirs plus ou moins longs.

Supposant que la pression s'exerce perpendiculairement à la section normale à l'arc et uniformément en tous les points de cette section, et supposant de plus que l'arc de cercle se confond avec l'arc de parabole passant par le sommet et par les naissances, on a (646 et 647),

$$Q = \frac{pd^2}{2f}$$

et

$$T = \sqrt{Q^2 + p^2d^2} = \frac{pd}{2f}\sqrt{d^2 + 4f^2}.$$

$p$ poids total, y compris la surcharge, par mètre de longueur du pont ;
$d$ demi-ouverture du pont ;
$f$ flèche ou montée de l'arc ;
T pression totale exercée normalement à la section transversale de l'arc aux naissances ;
Q composante horizontale de T.

C'est de la formule précédente que M. Poirée, ingénieur des ponts et chaussées, a tiré les résultats du tableau suivant.

L'examen de ce tableau montre que la plus grande charge, $4^k,40$ par millimètre carré de section, est fourni par l'ancien pont d'Austerlitz, qui a duré pendant plus de 40 ans, mais en exigeant souvent des réparations de détails (636). Le pont le plus chargé ensuite est celui du chemin de fer d'Avignon à Marseille, $3^k,36$ par millimètre carré, et il paraît se comporter parfaitement depuis 1855, date de sa construction. Vient ensuite le pont de Villeneuve-Saint-Georges, qui paraît avoir très-bien résisté à toutes les causes de fatigues.

| DÉSIGNATION des OUVRAGES. | Nombre d'arches. | Nombre d'arcs par arche | ESPACEMENT des arcs. | MODE de construction. | POIDS approximatif d'une travée, tout compris. | OUVERTURE de chaque arche. | FLÈCHE. | HAUTEUR des arcs. | SECTION des arcs ensemble par arche. | PRESSION par mill. carré sous le poids de la construction. | PRESSION par millimètre carré, en ajoutant une surcharge accidentelle au poids de la construction. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | m. | | tonnes. | m. | m. | m. | m.c. | k. | k. |
| Pont d'Austerlitz, à Paris. . . . . | 5 | 7 | 1.95 | Arcs en voussoirs évidés. | 623 | 32.30 | 3.23 | 1.25 | 0.212 | 3.95 | 4.40 avec une surcharge accidentelle de 200 kil. par mètre carré. |
| Pont du Carrousel, à Paris. . . . . | 3 | 4 | 2.80 | Syst. Polonceau, arcs en tubes elliptiques. | 546 | 47.00 | 4.90 | 0.84 | 0.38 | 1.9 | 2.34 *id.* |
| Viaduc du canal Saint-Denis (chemin de fer du Nord). . . . . | 1 | 4 | 2.10 sous les voies. 1.30 entre les voies. | *id.* | 246 | 31.22 | 3.45 | 0.84 | 0.294 | 1.03 | 1.81 avec une surch. accid. de 6000 kil. par mètre courant de pont. |
| Viaduc de Villeneuve-Saint-Georges (chemin de fer de Lyon). | 3 | 7 | 1.34 | Arcs en plaques double T. | 363 | 15.00 | 1.50 | 0.55 à la clef. | 0.241 | 1.73 | 2.59 *id.* |
| | | | | | | | | 0 70 aux naissances. | 0.281 | 1.88 | 2.81 *id.* |
| Viaduc du Mée, *id.* . | 3 | 7 | 1.34 | *id.* | 824 | 40.00 | 5.00 | 1.75 | 0.508 | 1.81 | 2.34 *id.* |
| Viaduc de la gare de Charenton. *id.* . | 2 | 7 | 1.34 | *id.* | 700 | 35.00 | 4.00 | 1.00 | 0.345 | *id.* | » *id.* |
| Viaduc de Bernières (ch. de fer de Troyes). | 3 | 6 | 1.43 sous les voies. 1.50 entre les voies. | *id.* | 213 | 22.00 | 2.45 | 0.50 | 0.22 | 1.49 | 1.95 *id.* |
| Viaduc de Montereau (ch. de fer de Troyes). | 4 | 6 | 1.43 sous les voies. 1.50 entre les voies. | *id.* | 240 | 24.60 | 3.13 | *id.* | *id.* | *id.* | » *id.* |
| Viaduc de Nevers. . . | 7 | 7 | 1.34 | *id.* | 800 | 42.00 | 4.55 | 1.15 | 0.50 | 2.00 | 2.7 *id.* |
| Viaduc du Rhône (ch. de fer d'Avignon à Marseille). . . . . | 7 | 8 | 1.25 | *id.* | 1800 | 60.00 | 5.00 | 1.70 | 1.016 | 2.8 | 3.36 *id.* |
| Viaduc de la Mulatière (à Lyon). . . . . | 4 | 9 | 1.20 sous les voies. 1.70 sous la route. | Syst. Polonceau. | 600 | 40.14 | 4.50 | » | 0.720 | 1.00 | 1.44 pour les arcs sous les voies en fer. |

Sur les chemins de fer, pour des portées qu'il convient de limiter à 8 mètres quand les ponts sont sous rails, on a beaucoup employé la fonte sous forme de poutres, dont on détermine les dimensions à l'aide des formules du n° 226.

Les fermes en fer sont le plus souvent en arc de cercle et composées ordinairement d'une seule pièce; on a cependant établi des fermes en fer droites et formées de barres droites composant des systèmes rigides.

Dans ces derniers temps on a beaucoup employé la tôle pour l'établissement des fermes de ponts des chemins de fer. Ces fermes sont généralement des poutres droites, dont la section, que l'on a variée d'un pont à un autre, se calcule à l'aide de la formule du n° 226; cependant, dans quelques constructions récentes, au pont d'Arcole, à Paris, par exemple, on a encore employé la tôle pour des fermes courbes.

La section des poutres en tôle est celle d'un rectangle creux, et pour les portées ordinaires elle est le plus ordinairement en double T, dont la tige et les nervures sont formées de plaques de tôle, le tout relié par des cornières en fer.

Comme les poutres en tôle ont une grande hauteur, leur face supérieure est ordinairement à un niveau supérieur à celui du plancher; elles servent assez souvent de parapet, et les deux voies du chemin de fer sont séparées par une poutre intermédiaire.

Des poutrelles ou entretoises en tôle à section double T reposent sur les nervures inférieures des poutres; sur ces entretoises on place des longrines qui supportent les rails et un plancher en bois sur lequel on étale une couche de sable.

Comme les poutres de tête ne sont chargées que d'un côté, pour éviter leur torsion, on les relie solidement par les entretoises, auxquelles on donne une certaine hauteur, et par suite une grande rigidité qui s'oppose à cette torsion. Sous ce point de vue, quand la hauteur le permet, il y a avantage à placer le plancher sur les poutres, qui peuvent alors être en plus grand nombre, de moindre section et plus maniables.

*Exemples de quelques ponts en tôle :*

Le premier pont en tôle établi en Angleterre, vers 1847, est formé de trois poutres creuses à section rectangulaire, entre lesquelles sont établies les deux voies du chemin de fer. Chaque poutre a $20^m,11$ de longueur et $18^m,28$ entre les culées; l'épaisseur de la tôle est de $0^m,0095$.

Les poutres de l'embarcadère flottant de Liverpool sont construites dans le même système. Elles ont $45^m,71$ de long; leur hauteur est de $1^m,67$ aux extrémités, et de $2^m,59$ au milieu; le corps de la poutre a $0^m,61$ d'épaisseur. La partie supérieure est divisée, par une cloison, en deux canaux rectangulaires ayant ensemble $0^m,76$ de largeur et $0^m,30$ de hauteur.

Un des plus beaux ponts à poutres creuses en tôle est celui qui vient d'être construit sur le Trent, à Grainsborough, pour le passage du che-

min de fer de Manchester et de Sheffield. Ce pont est formé de deux travées de 46m,92 d'ouverture chacune. Les poutres ont 3m,65 de haut.

La plus gigantesque construction en tôle est le pont-tube Britannia, construit par M. Stephenson, pour le passage sur la crique de Conway et le bras de Menay du chemin de fer de Chester à Holyhead. Ce pont se compose de 4 travées; les deux travées extrêmes ont 70m,09 de portée, les deux travées moyennes offrent un débouché de 140m,26 chacune. La longueur totale de l'ouvrage, y compris les piles et les culées, est de 561m,30. Les vaisseaux à voile peuvent passer sous le pont avec tous leurs mâts dehors. Ce pont se compose de deux tubes rectangulaires en tôle, dans chacun desquels passe une des voies du chemin. Il a coûté le prix excessif de 40 000 francs le mètre courant, dont 21 000 francs pour les fers seulement.

Chaque grand tube est formé d'une enveloppe extérieure, en plaques de tôle de 1m,20 à 2m,40 de long sur 0m,60 de large, et de 0m,0156 d'épaisseur au milieu du tube et 0m,0125 aux extrémités. Ces plaques sont rivées ensemble, et renforcées par des cornières de chaque côté des joints.

Le plafond du tube est formé de 8 tubes cellulaires, larges chacun de 0,506 et hauts de 0m,525. Le plancher est composé de 6 tubes cellulaires de chacun 0m,6875 de largeur sur 0m,525 de hauteur.

La hauteur du tube, y compris les cellules du plancher et du plafond, est de 6m,68 aux extrémités et de 7m,65 au milieu; sa largeur, comptée en dehors des plaques formant les parois latérales, est de 4m,20.

Pour permettre la libre dilatation du tube, les extrémités reposent sur 24 paires de rouleaux en fer.

Avant d'exécuter ce pont, par de nombreuses expériences sur des modèles au 1/6, on a constaté que la résistance à la rupture par traction de la partie inférieure de la poutre devenait égale à la résistance à la rupture par compression de la partie supérieure, lorsque la section de la partie inférieure était à celle de la partie supérieure dans le rapport de 11 à 12 (n° 230).

Les chemins de Versailles, de Saint-Germain, de Rouen et de l'Ouest traversent la Seine, à Asnières, sur un pont en tôle composé de cinq travées, dont les deux extrêmes ont 31m,09 d'ouverture et les trois autres 32m,70.

Les poutres en tôle sont des tubes à section rectangulaire de 2m,25 de hauteur; elles sont contreventées par des croix de Saint-André verticales en fer à section en E, et haut et bas par des traverses en T, dont les supérieures portent la voie posée sur des longrines en bois. La voie se trouve au niveau de la face supérieure des poutres, dont celles de rives, chargées seulement d'un côté, ne travaillent pas d'une manière très-satisfaisante.

Le chemin de fer du Nord traverse le canal de l'Escaut sur un pont

dont les poutres en tôle sont à double T. Il y a deux travées de chacune 14m,33 d'ouverture. Les poutres de tête ont 1m,40 de hauteur, le corps a 0m,018 d'épaisseur. 0m,009 pour chacune des feuilles qui le composent; les semelles horizontales ont 0m,150 de largeur sur 0m,015 d'épaisseur; elles sont reliées au corps vertical par des cornières en fer solidement rivées. Des consoles en fonte supportent les garde-corps en dehors des poutres, qui se trouvent ainsi chargées à peu près symétriquement de chaque côté. La poutre du milieu est plus forte que celles de tête, en raison de la charge plus considérable qu'elle porte. Les poutrelles sont très-fortes; elles contreventent les poutres, et elles supportent des longrines sur lesquelles sont posés les rails. La voie est à peu près au niveau de la face supérieure des poutres.

Ce qui suit est extrait d'une *Note sur les ponts en tôle du chemin de fer de ceinture*, publiée par M. Brame, ingénieur des ponts et chaussées, dans les *Annales*, année 1853.

*Légende du tableau suivant.*

1. *Pont sur l'avenue de Clichy.* Ce pont est supporté par 3 poutres reliées à leurs extrémités et dans l'intervalle par des entretoises. Les poutres et les entretoises sont en double T et formées de plaques de tôle reliées par des cornières en fer rivées. Sur les entretoises reposent les longrines supportant les rails, et un platelage recouvert d'une couche de sable. Les longrines ayant 0m,15 d'épaisseur, il en résulte que les poutres ne font saillie que de 0m,146 sur le niveau des rails.

2. *Pont sur la rue de l'entrepôt.* Ce pont est biais à 75°; son établier est analogue à celui du pont précédent; comme il est à 3 voies, il est supporté par 4 poutres, dont celles du milieu sont espacées de 3m,36 d'axe en axe.

3. *Pont sous le chemin de fer du Nord.* La hauteur disponible étant faible, on a dû restreindre celle des poutres, dont le nombre est de 5. Les rails sont encore placés sur longrines. Un platelage de 0m,07, reposant sur des fourrures en bois, est établi au niveau des longrines et des poutres, de sorte que les rails seuls sont en saillie. Une couche de sable recouvre le platelage.

4. *Pont supportant la route de Paris à Saint-Denis sur le chemin de fer de ceinture.* La chaussée supportée a 66 mètres de largeur, divisés en trois parties sensiblement égales; les deux extrémités sont réservées aux piétons; la partie centrale se compose d'une chaussée pavée de 8 mètres, et de deux chaussées latérales en empierrement de 7 mètres chacune de largeur.

Sous les contre-allées réservées aux piétons, la charpente du tablier a été composée de poutres en fer double T de 0m,22 de hauteur, réunies par des entretoises de même forme. Sur cette charpente, on a établi un plancher en tôle ondulée, que l'on a recouvert d'une couche de béton fin, puis du bitume sur lequel on marche.

Pour la partie de 22 mètres destinée au passage des voitures, et pour laquelle nous avons formé la 4e colonne du tableau suivant, les poutres sont en tôle comme pour les ponts précédents; elles sont également reliées par des entretoises en tôle; mais au lieu d'établir un platelage pour supporter la chaussée, on a fait des voûtes en briques reposant sur des coussinets placés sur les semelles inférieures des poutres. Ces voûtes ont 0m,22 d'épaisseur et 2m,62 de rayon.

Il n'y a que trois cours d'entretoises; mais entre la première et la deuxième poutre de chaque extrémité, il y a des entretoises supplémentaires pour résister à la poussée des voûtes.

Les extrados des voûtes sont au niveau des poutres; on a nivelé le tout avec du

béton, que l'on a couvert d'une chape en bitume, sur laquelle repose la couche de sable, puis le pavé de $0^m,15$ d'épaisseur.

L'épaisseur totale de la chaussée, comptée du dessous des poutres, est de $0^m,95$ au milieu et de $0^m,65$ près des contre-allées. Le bombement est gagné sur la couche de sable.

5. *Pont du chemin d'Aubervillers.* Ce pont, supportant une route vicinale peu importante, est établi suivant un biais de 71°. Il a une ouverture de $7^m,87$ suivant le biais et de $7^m,40$ normalement aux culées.

Le tablier se compose de deux poutres de tête parallèles à l'axe du chemin, et de huit entretoises parallèles à la voie de fer. Ces entretoises supportent un plancher analogue à ceux des ponts suspendus, et de $3^m,50$ entre les trottoirs.

6. *Pont du chemin de fer de Strasbourg.* Le chemin de ceinture passe sous la ligne de Strasbourg, qu'il rencontre sous un angle de 35°. L'ouverture du pont est de $7^m,40$ normalement aux culées.

Il était nécessaire, pour ne pas placer le chemin de ceinture trop bas, de diminuer autant que possible l'épaisseur du plancher. Pour cela, on a supporté le plancher à l'aide de trois poutres longitudinales reliées par des entretoises perpendiculaires à leur direction, et les longrines, qui ont $0^m,30$ sur $0^m,486$, au lieu de reposer sur les entretoises, sont placées dans des caissons en tôle et cornières reposant à leurs extrémités sur les semelles inférieures des entretoises. Les deux feuilles verticales du caisson sont fixées aux entretoises par des cornières, régnant et portant la charge sur toute leur hauteur. Le rail, qui fait seul saillie au-dessus des entretoises, répartit d'ailleurs la pression sur les longrines, forcément interrompues à leur rencontre avec les entretoises. Cette disposition est applicable à des portées beaucoup plus grandes sans qu'il soit nécessaire d'augmenter l'épaisseur du tablier.

| DÉTAILS. | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | m. | m. | m. | m. | m. | m. |
| Poutres | | Longueur totale | 9.002 | 7.20 | 8.40 | 8.40 | 9.00 | 15.00 |
| | | Portée | 8.002 | 6.20 | 7.40 | 7.40 | 7.87 | » |
| | | Écartement d'axe en axe | 3.71 | 3.634 | 1.675 | 2.072 | 6.00 | 3.90 |
| | | Hauteur | 0.80 | 0.70 | 0.508 | 0.45 | 0.60 | 1.00 |
| | | Épaisseur de la tôle verticale | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.012 | 0.01 | 0.01 |
| | Poutres de têtes. | Largeur de la semelle horizontale | 0.18 | 0.18 | 0.20 | 0.30 | 0.20 | 0.40 |
| | | Épaisseur *id.* | 0.025 | 0.021 | 0.025 | 0.02 | 0.01 | 0.027 |
| | Poutres intermédiaires. | Largeur des semelles horizontales | 0.30 | 0.18 | 0.265 | 0.30 | » | 0.40 |
| | | Épaisseur *id.* | 0.026 | 0.0345 | 0.036 | 0.03 | » | 0.0405 |
| | Cornières. | Largeur et hauteur totale | 0.08 | 0.08 | 0 08 | 0.08 | 0.08 | 0.09 |
| | | Épaisseur | 0.01 | 0.01 | 0.014 | 0.012 | 0.012 | 0.012 |
| Entretoises. | | Écartement d'axe en axe | 1.286 | 1.161 | 1.20 | 2.05 | 1.22 | 2.00 |
| | | Hauteur | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.45 | 0.35 | 0.23 |
| | | Épaisseur de la tôle verticale | 0.008 | 0.008 | 0.008 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| | | Largeur des semelles horizontales | 0.148 | 0.14 | 0.138 | 0.16 | 0.17 | 0.36 |
| | Cornières. | Largeur et hauteur totale | 0.07 | 0.07 | 0.065 | 0.07 | 0.08 | 0.08 |
| | | Épaisseur | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.012 | 0.012 |
| Poids total du tablier | | | 15500 | 18000 | 18500 | 250000 | 9000 | 30000 |

*Calcul des poutres et entretoises.* Pour les ponts 1 et 2, qui ont une faible portée, la surcharge maximum se réalise quand il y a une locomotive sur chaque voie, et que les roues motrices sont au milieu du pont. Pour une locomotive de 29 tonnes, si l'on admet que 17 tonnes reposent sur les roues motrices, et 6 tonnes sur chacune des autres paires de roues, dont les essieux sont espacés de 4 mètres (469), décomposant 6000 kilog. en deux forces appliquées l'une au milieu de la poutre et l'autre sur la culée, la première composante est, pour le pont n° 1, $6000 \times \frac{2,001}{4,001}$ soit 3000 kilog. (*Int.* 1390). La surcharge, appliquée au milieu du pont, équivalente à une locomotive est donc 23000 kil. La poutre du milieu supporte alors la moitié du poids du tablier réparti uniformément sur toute sa longueur, plus une charge de 23000 kilog. agissant en son milieu ; la formule du n° 226 donnera alors ses dimensions. Les poutres de rives agissent comme celle du milieu, mais seulement sous des charges deux fois plus faibles.

Quant aux entretoises, la surcharge la plus considérable se réalise quand les deux roues motrices passent dessus. Pour le pont n° 1, le poids appliqué au milieu de l'entretoise, équivalant à la charge transmise par les roues motrices, est, ces roues étant espacées de $1^m,50$ et l'entretoise ayant $3^m,71$ de longueur, $17000 \times \frac{1,105}{1,855}$, soit 10000 kilog. Près de cette surcharge le poids du tablier reposant sur l'entretoise étant négligeable, les formules du n° 224 sont applicables.

Pour le pont 3, on suit une marche analogue pour calculer les sections des poutres et des entretoises.

Pour le pont 6, qui est assez long, à cause de son biais, pour qu'une partie du tender ou d'une seconde locomotive s'y trouve en même temps que la première, on suit encore la même marche; mais on peut simplifier la question pour les poutres en supposant qu'une surcharge de 80 tonnes est répartie uniformément sur la longueur de chaque voie, indépendamment du poids du tablier (225).

Quant aux ponts 4 et 5, on calcule les poutres et les entretoises en supposant que la surcharge indépendante du poids du tablier est de 400 kil. uniformément répartis sur chaque mètre carré (225) ; c'est la charge d'épreuve.

*Devis, rapporté au mètre superficiel, du tablier du pont n° 4* (route de Saint-Denis), *de 7m,40 d'ouverture.*

1° *Pour la chaussée proprement dite, qui a 22 mètres de largeur :*

| | fr. |
|---|---|
| Tôle pour poutres et entretoises | 94,666 |
| Fonte pour sabots, plaques et retombées | 7,990 |
| Plomb pour scellements | 4,676 |
| Voûtes en briques hourdées en ciment | 12,416 |
| Cintres | 2,928 |
| Chape en mortier | 2,910 |
| Chape en bitume | 5,000 |
| Chaussée pavée | 9,000 |
| Prix du mètre carré de tablier pour chaussée | 139,586 |

2° *Pour les contre-allées :*

| | fr. |
|---|---|
| Poutres, entretoises et boulons d'assemblage | 25,808 |
| Plaques en fonte | 0,915 |
| Tôles ondulées | 12,565 |
| Fers méplats, cornières, etc. | 1,927 |
| Chape en béton | 2,910 |
| Bitume | 5,000 |
| Total | 49,125 |

*Comparaison entre les prix des ponts en tôle et ceux des ponts en maçonnerie.* Les chiffres suivants ne comprennent que les travaux d'art et non point les abords.

| | fr. |
|---|---|
| Pont n° 4 (route de Saint-Denis) pour la chaussée de 7m,40 de portée et de 22 mètres de largeur réservée aux voitures, en tôle | 38365,83 |
| La tôle figure dans ce prix pour | 18368,00 |
| Ce pont établi en maçonnerie aurait coûté | 36000,00 |
| Pont n° 5 (chemin d'Aubervilliers), de 7m,40 d'ouverture et de 6 mètres de largeur, en tôle | 16532,15 |
| Le même pont en maçonnerie | 17500,00 |
| Pont de 14 mètres d'ouverture projeté pour supporter le chemin de ceinture au-dessus de la route de Flandre, en tôle | 30000,00 |
| Le même pont en maçonnerie | 32500,00 |

Ces chiffres montrent que, pour les faibles portées et avec les prix admis aux environs de Paris, la tôle ne présente d'avantage réel sur la maçonnerie qu'en ce qui a rapport à la moindre épaisseur de tablier et à la plus grande facilité d'exécution.

Avec les prix du chemin de fer de ceinture, 0f,45 le kilog. de fer, et 0f,35 le kilog. de fonte, les planchers à poutres en fonte coûtent plus cher que ceux en tôle. En employant, comme le font quelques ingénieurs, de la fonte de première fusion, on réduirait le chiffre de 0f,35.

**645.** *Planchers de ponts en poutres de fonte double* T *et voûtes en briques.* Ce système, qui a une grande ressemblance avec celui du pont n° 4 du numéro précédent, dans lequel les poutres sont en tôle au lieu d'être en fonte, a été employé avec beaucoup de succès par M. Flachat pour supporter les chaussées au-dessus du chemin d'Auteuil, et dans la construction des caves de la nouvelles gare du chemin de fer de l'Ouest.

Au chemin d'Auteuil, pour une ouverture de $7^m,00$ entre les culées et une largeur de pont de $8^m,00$, dont $1^m,00$ de chaque côté pour trottoirs, le plancher se compose de 4 poutres double T espacées de $2^m,00$ d'axe en axe pour supporter la chaussée de $6^m,00$, et de deux poutres de tête espacées de $1^m,00$ des voisines pour supporter un côté des trottoirs, qui sont en madriers de $0^m,08$ d'épaisseur. Les poutres intermédiaires ont $0^m,60$ de hauteur et celles de tête $0^m,80$. Les faces inférieures des poutres sont toutes de niveau et à une hauteur de $4^m,50$. Les 4 poutres de la chaussée sont reliées par deux cours d'entretoises en fonte double T, de $0^m,30$ de hauteur et de $0^m,12$ de largeur de semelles, divisant la distance des culées en trois parties égales de $2^m,333$. C'est sur les semelles de ces entretoises et sur les culées que reposent les voûtes en bonnes briques ordinaires, de $0^m,22$ d'épaisseur et de $2^m,33$ de flèche, lesquelles, par cette disposition, ne poussent pas les poutres au vide comme au pont 4 du numéro précédent, et reportent une partie de leur poids sur les culées. Les entretoises reposent sur les semelles inférieures des poutres, et leurs extremités portent des oreilles qui permettent de les relier solidement aux joues des poutres par 4 boulons.

On a donné aux poutres la forme de solides d'égale résistance, en faisant varier, non la hauteur $h$ de la pièce (232), mais seulement $h'$, c'est-à-dire l'épaisseur des nervures.

Pour déterminer la section de la poutre en un point quelconque situé à la distance $x$ du point d'appui voisin, on a d'abord cherché le moment de la charge par rapport au point correspondant à $x$; ce moment est, en supposant la charge uniformément répartie, ce qui n'a pas lieu dans le cas actuel, qui donne cependant des sections à très-peu près les mêmes et que l'on peut adopter dans la pratique,

$$\frac{p}{2}(\mathrm{L}x - x^2).$$

Égalant ce moment à celui de résistance des fibres, on a

$$\frac{p}{2}(\mathrm{L}x - x^2) = \frac{\mathrm{RI}}{n}. \qquad (225)$$

Pour une poutre double T, on a (n° 220, fig. 49)

$$\frac{p}{2}(\mathrm{L}x - x^2) = \frac{\mathrm{R}}{n}\,\frac{bh^3 - b'h'^3}{12}.$$

Formule dans laquelle $n = \frac{h}{2}$ quand les deux nervures sont égales, comme on le fait généralement, et dont celle du n° 225 n'est qu'un cas particulier où $x = \frac{L}{2}$.

Au chemin d'Auteuil on a fait pour les poutres de la chaussée proprement dite $p = 1600$ kil. par mètre courant de poutre, surcharge comprise, $h = 0^m,60$, $b = 0^m,28$ environ, $b' = 0^m,26$ (l'épaisseur de l'âme de la poutre est $0^m,02$), et de la formule précédente on a déduit $h' = 0^m,52$, c'est-à-dire $\frac{h - h'}{2} = 0^m,04$ pour l'épaisseur des nervures au milieu de la longueur de la poutre.

La formule précédente donne de même les valeurs de $h'$, et par suite les épaisseurs des nervures, pour les différentes valeurs de $x$; mais comme il ne convient pas que l'épaisseur des nervures soit inférieure à celle de l'âme de la poutre, que l'on prend aussi petite que le comporte un coulage satisfaisant, dès qu'on arrive à cette limite, la diminution de la section se reporte sur $h$, dont la formule donne encore les valeurs, et comme pour $x = 0$ on aurait $h = 0$, on assigne à $h$ une valeur-limite inférieure, laquelle, une fois atteinte, reste constante jusqu'à l'extrémité de la poutre. Cette valeur inférieure de $h$, au chemin d'Auteuil, est de $0^m,40$.

Pour les entretoises, on a fait $L = 2^m,00$, $h = 0^m,30$, $b = 0^m,20$, $b - b' = 0^m,012$ et $\frac{h - h'}{2} = 0^m,014$.

L'épaisseur du plancher au milieu de la chaussée est de $0^m,75$.

### PONTS SUSPENDUS.

**646.** *Ponts suspendus.* Dans ce système de ponts, comme le fait voir la figure 33, planche III, une chaîne en fer, ou un câble en fil de fer, dont les extrémités sont solidement amarrées dans le sol, passe sur deux piliers en maçonnerie, et supporte, à l'aide de tiges en fer, le tablier du pont.

Les tiges de suspension $a$, $b$, $c$, etc., étant toutes également éloignées horizontalement, et le poids total, câbles, tiges, tablier, charge d'épreuve, etc., étant le même entre deux tiges consécutives quelconques, ce qui a lieu sensiblement dans un pont suspendu, les points d'attache $a$, $b$, $c$, $d$, etc., des tiges sur le câble, sont sur une même parabole dont l'équation est

$$y = \frac{p}{2Q}(x^2 - x_0^2). \qquad (Int.\ 1113)$$

$y$ et $x$ coordonnées d'un quelconque des points $a$, $b$, $c$, $d$, etc. ;

$x_0$ abscisse du premier point $a$ placé sur la partie horizontale $a'a$ ;

$p$ charge par mètre de longueur de tablier ; elle comprend le poids du câble, des tiges, du tablier, de la surcharge, etc. ;

Q tension horizontale de la chaîne ; c'est la seule force qui sollicite la partie horizontale $aa'$.

Si au lieu d'avoir un côté horizontal $aa'$, le point d'attache $a$ se trouvait au sommet de la courbe, on aurait $x_0 = 0$, et l'équation précédente deviendrait

$$y = \frac{p}{2Q} x^2.$$

Si dans cette équation on fait :

$y = f$, flèche correspondant à la partie parabolique du câble, partie que l'on peut supposer s'étendre au delà des tiges extrêmes de suspension, d'une quantité dont la projection horizontale est égale à la demi-distance horizontale de deux tiges consécutives ;

$x = d$, abscisse du point où finit la parabole. Il est à remarquer que si les extrémités du tablier ne portaient pas sur les culées, et si le tablier se prolongeait d'une demi-distance horizontale de deux tiges consécutives au delà des tiges extrêmes, $d$ serait la demi-ouverture du pont ou la distance horizontale du sommet de la courbe à l'extrémité du tablier que l'on considère, et $f$ correspondrait à cette extrémité ; au delà des points qui fournissent $d$ et $f$, et jusqu'aux points de suspension, les câbles se prolongent très-sensiblement en ligne droite, suivant les tangentes aux extrémités de la courbe,

on a

$$Q = \frac{pd^2}{2f}.$$

**647.** *Tension des chaînes.* Toutes les autres forces qui sollicitent les différents points de la chaîne étant verticales, il en résulte que la tension horizontale Q est constante, et que si l'on considère une autre partie quelconque $eg$ de la chaîne, sa tension sera la résultante de la force horizontale Q, et d'une force verticale égale à la somme des poids appliqués depuis le point $e$ jusqu'au sommet de la courbe, poids qui est égal à $px_1$, $x_1$ étant l'abscisse du point milieu de $eg$. Comme les deux composantes Q et $px_1$ sont perpendiculaires entre elles, leur résultante, que nous désignerons par $T_1$, est

$$T_1 = \sqrt{Q^2 + p^2 x_1^2}.$$

La tension de la chaîne est à son maximum au sommet du pilier, ou sensiblement au point correspondant à $f$ et $d$ (646), car la partie droite du câble, dans la plupart des cas, peut être négligée, et pour ce point, si l'on représente par T la tension, on a

$$T = \sqrt{Q^2 + p^2 d^2}.$$

Remplaçant Q par sa valeur, il vient

$$T = \sqrt{\frac{p^2 d^4}{4f^2} + p^2 d^2} = \frac{pd}{2f}\sqrt{d^2 + 4f^2}.$$

Formule à l'aide de laquelle on calculera la section des câbles, car l'augmentation de tension due à la portion droite du câble entre la partie courbe et le point de suspension est en général négligeable.

**648.** *Longueur des tiges de suspension.* On a (646)

$$y = \frac{p}{2Q}x^2 = \frac{f}{d^2}x^2.$$

Donnant successivement à $x$ les valeurs qui correspondent aux diverses positions des tiges, on en conclut les valeurs respectives de $y$, et en ajoutant à chacune des valeurs de $y$ une longueur égale à la distance à laquelle les diverses tiges descendent au-dessous du sommet de la courbe, on aura les longueurs des tiges.

Quand on aura besoin de connaître la longueur totale de toutes les tiges, s'il y a une tige placée au sommet de la courbe, la somme de toutes les parties comprises au-dessus du niveau de ce sommet, et pour chaque côté de ce sommet, sera égale à la somme de toutes les valeurs précédentes de $y$, c'est-à-dire à

$$s = \frac{fl^2}{d^2}(1^2 + 2^2 + 3^2 + \text{etc.}).$$

Or, la somme des carrés des $n$ premiers nombres entiers consécutifs étant $\frac{1}{6}n(n+1)(2n+1)$, cette formule devient

$$s = \frac{fl^2}{6d^2}n(n+1)(2n+1).$$

$s$ somme totale des parties de tiges comprises au-dessus du sommet de la courbe, pour un côté de ce sommet ;

$l$ distance des tiges ; $l$, $2l$, $3l$, etc., sont les diverses valeurs que l'on a substituées à $x$ pour obtenir la formule précédente ;

$f$ et $d$ ont les mêmes significations qu'au n° 646.

Lorsqu'il n'y a pas de tige au sommet, si l'on fait $l_1 = \frac{l}{2}$, on remarque que les abscisses des points successifs d'attache sont $l_1$, $3l_1$, $5l_1$, etc., et on a

$$s = \frac{fl_1^2}{d^2}(1^2 + 3^2 + 5^2 + \text{etc.}).$$

La somme des carrés des $n$ premier nombres impairs étant $\frac{1}{3}n(4n^2 - 1)$, il vient donc

$$s = \frac{f l_1^2}{3d^2} n (4n^2 - 1).$$

Pour avoir la longueur totale des tiges, à la somme $s$ des parties supérieures au point bas de la courbe, il faut ajouter la somme des parties inférieures à ce point. Si le plancher était horizontal, cette seconde somme serait égale au produit de la quantité dont chaque tige descend au-dessous du point bas par le nombre des tiges. Si le tablier a une forme parabolique, on peut calculer cette seconde somme en procédant de la même manière que pour la première. Mais, dans cette évaluation de longueur totale, on peut supposer que toutes les tiges descendent à une même distance au-dessous du point bas de la courbe.

M. Mary rapporte avoir ouï dire à un constructeur de ponts suspendus que pour ne pas s'inquiéter du bombement du tablier, il calculait la longueur de ses tiges dans l'hypothèse d'un tablier horizontal, et qu'il donnait à la chaîne une longueur diminuée de manière à relever le sommet de la parabole du bombement qu'il voulait donner au plancher. D'après le même constructeur, une travée de 100 mètres s'abaisserait de $0^m,10$ au sommet après la pose du tablier; il faut donc avoir égard à cette circonstance en réglant la longueur des tiges.

**649.** *Longueur de la chaîne.* Cette longueur est égale à la somme des parties droites comprises entre les différents points de suspension. En remarquant que l'une quelconque $u_n$ de ces parties est l'hypoténuse d'un triangle rectangle dont l'un des côtés est la distance $l$ des tiges, et dont l'autre est la différence des deux ordonnées $y_n$ et $y_{n-1}$ des deux extrémités de la partie droite considérée (648), il en résulte qu'on a

$$u_n = \sqrt{l^2 + (y_n - y_{n-1})^2}.$$

Calculant de même la longueur des divers éléments de la chaîne, en en faisant la somme on aura la longueur totale.

On conçoit que ces calculs sont assez longs; dans le plus grand nombre de cas on n'a pas besoin d'avoir la longueur rigoureuse de la chaîne, et on peut la supposer égale à la longueur de la parabole circonscrite, longueur qui est, pour un côté, à partir du sommet et jusqu'au point correspondant à $f$ et $d$ (646),

$$\mathrm{L} = d \left(1 + \frac{2f^2}{3d^2}\right). \qquad (a)$$

La chaîne étant symétrique par rapport au point bas, on aura la longueur totale de la partie parabolique en doublant cette valeur de L. Si la chaîne ne s'élevait pas à la même hauteur à ses deux extrémités, on calculerait la longueur L′ de la seconde partie comme on a calculé L, en modifiant convenablement $d$ et $f$ (646). Ajoutant les longueurs des parties droites du câble à celles des portions paraboliques, on obtiendrait la longueur totale.

**650.** *Piliers inégalement élevés.* Toutes les formules précédentes s'appliquent encore à ce cas, mais en considérant séparément chaque partie de la courbe, à droite et à gauche du point bas, et en faisant, pour chaque partie, $f$ égal à la flèche extrême de la partie courbe qui y correspond, et $d$ égal à la distance horizontale du point bas au point le plus élevé de la partie courbe considérée (646).

Il faut donc pouvoir déterminer la distance du sommet de la courbe à chaque point de plus grande flèche de chacune des parties courbes. $f_1$ et $f_2$ étant ces plus grandes flèches, qui sont des données du projet, $2d$ la distance totale horizontale des points de flèches $f_1$ et $f_2$, $d_1$ la distance horizontale du sommet de la courbe au point de flèche $f_1$, et $d_2$ sa distance au point de flèche $f_2$, on a

$$d_1 = \frac{2d\sqrt{f_1}}{\sqrt{f_1}+\sqrt{f_2}}, \quad \text{et par suite} \quad d_2 = 2d - d_1.$$

On a aussi

$$d_2 = \frac{2d\sqrt{f_2}}{\sqrt{f_2}+\sqrt{f_1}}.$$

**651.** *Augmentations de la longueur de la chaîne et de la flèche par suite de la dilatation et de la tension de la chaîne.* L étant la longueur de la partie courbe de la chaîne (649), le fer s'allongeant de $0^m,000\,012\,2$ par degré centigrade (259), pour une augmentation de température de $t°$, la longueur L s'allongera de

$$\delta = L \times 0{,}000\,012\,2 \times t,$$

et la longueur de la chaîne deviendra $L + \delta$.

Appelant $x$ l'augmentation de la flèche, cette flèche deviendra $f + x$. Substituant ces nouvelles valeurs des longueurs de chaîne et de flèche dans la formule (*a*), n° 649, on a

$$L + \delta = d\left(1 \times \frac{2}{3}\frac{f^2 + 2fx + x^2}{d^2}\right).$$

Retranchant L du premier membre, et sa valeur du second (649), on a

$$\delta = d \times \frac{2}{3}\frac{2fx + x^2}{d^2};$$

d'où l'on tire, en négligeant $x^2$, qui est très-petit près de $fx$,

$$x = \frac{3d}{4f}\delta.$$

Cette formule, qui donne directement $x$ en fonction de $\delta$, n'est rigoureusement applicable que quand la courbe est symétrique par rapport

à son point bas, c'est-à-dire quand les deux piliers s'élèvent à la même hauteur, et que, par suite, $\delta$ est l'allongement de chacune des deux parties courbes de la chaîne.

On peut encore établir des formules semblables aux précédentes pour déterminer l'augmentation de flèche due à la tension des chaînes. Ainsi on a

$$\delta' = \frac{L \times 0{,}000054 \times T}{\omega} = \frac{L \times T}{18518\omega}.$$

$\delta'$ allongement de la longueur de la demi-parabole ;
L longueur de la demi-parabole (649) ;
$0^m{,}000054$ allongement d'une tige de fer de 1 mètre de longueur et de 1 millimètre carré de section, sous une tension de 1 kilogramme (216) ;
T tension du câble en kilogrammes ; cette dernière formule la suppose uniforme sur toute la longueur de la chaîne ;
$\omega$ section de la chaîne en millimètres carrés.

Représentant par $x'$ l'augmentation de flèche due à $\delta'$, on a encore

$$x' = \frac{3d}{4f}\delta'.$$

La détermination de l'allongement des parties droites des câbles au delà des portions courbes n'offre aucune difficulté, et on déterminera facilement son influence sur l'abaissement du sommet de la courbe.

**632.** *Section des chaînes et des tiges.* La tension des chaînes variant en tous les points de la longueur, il en résulte que la section pourrait être variable en tous ces points. Cependant on fait cette section constante, et suffisante pour résister avec toute sécurité à la valeur maximum de T (647). Quoique le fer de l'échantillon employé pour les chaînes ne se rompe que sous un effort moyen de 40 kilogrammes par millimètre carré de section, les autorités prescrivent de ne pas le soumettre à une charge de plus de 12 kilogrammes. Pour le fil de fer, la charge maximum prescrite est de 18 kilogrammes, quoiqu'il ne se rompe que sous une tension moyenne de 60 kilogrammes (216). Ainsi, selon que l'on fera usage du fer forgé ou du fil de fer, $\omega$ étant, en millimètres, la section des chaînes ou des cables, on aura au minimum

$$\omega = \frac{T}{12}, \quad \text{ou} \quad \omega = \frac{T}{18}.$$

$\omega$ est la section de tous les câbles quand, dans la valeur de T, $p$ comprend le poids de tout le tablier, de toutes les tiges et chaînes, et la surcharge de 200 kilogrammes par mètre carré que l'on répartit sur tout le pont lors de l'essai (page 913). Connaissant $\omega$, en divisant par le nombre total de chaînes, on aura la section de chacune d'elles, que l'on place en même nombre de chaque côté du pont.

Nous disons que $p$ contient le poids de la chaîne; mais comme ce

poids n'est pas connu, puisqu'il dépend de la section, il convient de lui attribuer une valeur que l'on préjuge convenable, de déterminer la valeur correspondante de T, et par suite celle de $\omega$; de cette valeur de $\omega$ on conclut une seconde valeur de $p$ qui permet de calculer T et $\omega$ aussi exactement qu'il est nécessaire.

La section des chaînes, multipliée par leur longueur (649), puis par la densité du fer, donnera leur poids total.

De la charge d'une tige de suspension, on conclura la section comme pour les chaînes. La charge d'une tige est égale à la moitié du poids d'une longueur de tablier égale à la distance de deux tiges successives, plus la moitié du poids de la plus lourde voiture qui peut passer sur le pont, il conviendrait encore de faire entrer le poids de la tige dans la charge qu'elle supporte, mais ce poids est négligeable.

M. Endrès, ingénieur des ponts et chaussées, dans un travail qu'il a bien voulu nous communiquer, et que depuis il a publié dans les Annales du corps auquel il appartient, a posé une formule qui évite le tâtonnement dont il vient d'être question pour calculer la section des câbles.

Dans son travail, M. Endrès remarque que la tension du câble, posée n° 647, peut se mettre sous les deux formes

$$T = \frac{pd}{4\mu}\sqrt{16\mu^2+1} \quad \text{et} \quad T = \frac{pd}{\sin\alpha}.$$

$\mu$ rapport de la flèche $f$ au double de $d$ (646);

$\alpha$ angle que forme la tangente à la courbe, au point le plus élevé, avec l'horizon. Cette tangente venant rencontrer l'axe de la courbe à une distance au-dessous du sommet égale à $f$ (*Int.*, 1125), on a $\operatorname{tang}\alpha = \frac{2f}{d} = 4\mu$, et

$$\sin\alpha = \frac{\operatorname{tang}\alpha}{\sqrt{\operatorname{tang}^2\alpha+1}} = \frac{4\mu}{\sqrt{16\mu^2+1}} \text{ (*Int.*, 964 et 981).}$$

Ayant

$$pd = p'd + L\omega\delta,$$

$p'$ poids par mètre de longueur de pont en négligeant les câbles; $p'$ est égal à $p$ moins le poids des câbles (646);

L longueur du câble (649);

$\delta$ poids du centimètre cube de la matière dont le câble est composé. Si l'on exprimait L en décimètres et $\omega$ en décimètres carrés, on ferait $\delta$ égal à la densité de la matière du câble, c'est-à-dire à $1000\delta$.

on peut donc poser

$$T = \frac{p'd + L\omega\delta}{\sin\alpha}.$$

Comme on a aussi, en désignant par $\rho$ la tension qu'il convient de faire supporter à chaque millimètre de la section $\omega$,

$$T = \omega\rho,$$

on a donc

$$\omega\rho = \frac{p'd + L\omega\delta}{\sin\alpha}, \quad \text{d'où} \quad \omega = \frac{p'd}{\rho\sin\alpha - L\delta};$$

expression qui permet de calculer $\omega$ sans tâtonnement, et qui devient, suivant que l'on fait usage de chaînes en fer forgé ou de câbles en fil de fer,

$$\omega = \frac{p'd}{12\sin\alpha - 0{,}0078\,L} \quad \text{ou} \quad \omega = \frac{p'd}{18\sin\alpha - 0{,}0078\,L}.$$

La relation posée ci-dessus entre $\sin\alpha$ et $\mu$ permet de faire disparaître l'angle $\alpha$ de la valeur de $\omega$; on pourrait même proscrire $\mu$ en le remplaçant par sa valeur $\frac{f}{2d}$; mais ces substitutions compliqueraient la formule sans aucun avantage réel, attendu que le rapport $\mu$ de la flèche à l'ouverture et l'angle $\alpha$ de la tangente extrême avec l'horizon sont des éléments essentiels du problème, éléments qu'il faut calculer dans tous les cas, puisqu'il est nécessaire de s'assurer si les valeurs de $d$ et $f$ sont telles que $\mu$ ne sorte pas des limites $\frac{1}{10}$ et $\frac{1}{15}$ qui lui sont communément assignées, et que la connaissance de l'angle $\alpha$ est indispensable pour la détermination ultérieure de la résistance à donner aux piliers de support et de la direction qui convient aux câbles de retenue. Aux limites précédentes de $\mu$ correspondent celles $\frac{6}{15}$ et $\frac{4}{15}$ de tang $\alpha$.

Dans son travail, M. Endrès a fait l'application de sa formule au calcul de la section des câbles ou chaînes de plusieurs ponts choisis parmi les plus remarquables de ceux existants, et les résultats, comme on devait s'y attendre, ont fourni à la théorie une vérification aussi complète que possible.

**633.** *Fabrication des chaînes et des tiges.* Le fer forgé employé à la fabrication des chaînes doit être de première qualité. Ces chaînes doivent être faites avec le plus grand soin; il faut donner rigoureusement le même diamètre aux boulons de jonction des chaînons et à l'œil qui les reçoit (page 260).

Quelques précautions que l'on apporte à la fabrication des chaînes en fer forgé, il leur est arrivé de se rompre, en Angleterre, où le fer est de très-bonne qualité, aussi bien qu'en France. Les câbles en fil de fer au contraire ne se sont jamais rompus. Quant à la durée des chaînes et des câbles, l'expérience n'a pas encore prononcé, mais on admet qu'elle est la même pour les chaînes que pour les câbles.

Les fils de fer ordinairement employés à la fabrication des câbles ont $0^m,00275$ et $0^m,00308$ de diamètre, ce qui donne pour sections respectives $5^{mill.c.},94$, et $7^{m.c.},45$; le premier est du n° 17 et le second du n° 18. Les bouts de fil ont environ 150 mètres de longueur. En les mettant en câbles, on a soin d'opérer sur le fil une traction constante, suffisante pour faire disparaître les ondulations qu'il a prises par suite de la disposition en couronne qu'on lui donne pour le livrer au commerce. Quand un fil est placé sur le câble, on relie son extrémité à un autre bout, afin que le câble terminé soit comme formé d'un seul fil. Pour réunir les extrémités de deux fils, on les croise sur une longueur de $0^m,10$, et sur $0^m,07$ de ce croisement on les serre avec un fil recuit du n° 4, dont on met les spires en contact.

Si la température varie pendant la fabrication du câble, il convient de rendre mobile une des croupières sur lesquelles passe le fil à l'extrémité du câble, afin d'opérer sur cette croupière une traction qui tienne toujours bien tendue la partie de câble fabriquée, malgré son allongement dû à la dilatation. Par cette disposition, une fois le câble terminé, tous les fils y sont dans un même état de tension, ce qui est de la plus grande importance pour la solidité du câble. Afin de reconnaître à chaque instant en quel point doit se trouver la croupière mobile, avant de commencer le câble, on tend un fil de fer allant d'une extrémité du câble à l'autre; on tient ce fil dans un état de tension constant à l'aide d'un poids, lequel, étant fixé à l'extrémité d'un fil flexible passant sur une poulie mobile, donne, par son mouvement, les allongements ou raccourcissements du fil étalon, et par suite la position que doit occuper la croupière mobile.

D'après les expériences de M. Leblanc, pour faire disparaître toutes les inflexions que les fils prennent, par suite de leur mise en couronnes, et qu'ils tendent à conserver lorsqu'on les met en câbles, il faut, avant de les contourner sur chaque croupière, les soumettre à une tension de 300 à 500 kilog. Cette précaution porte la résistance du câble aux 0,86 ou 0,90 de la somme des résistances de tous les fils de fer pris séparément; au lieu que si cette traction préalable n'est que de 50 kilog., la résistance totale n'est que les 0,84, et les 0,81 seulement si la tension n'est que de 25 kilog.

Lorsque tout le fil est placé en écheveau sur les deux croupières, on réunit les deux brins de l'écheveau, pour en former le câble, à l'aide de fil de fer dont on fait toucher les spires. D'après M. Leblanc, les câbles autour desquels il y a le plus de ligatures sont les plus résistants. Ordinairement, les ligatures ont de $0^m,10$ à $0^m,11$ de longueur et sont éloignées d'un espace à peu près double.

Afin de préserver les câbles de l'oxydation, avant de mettre les fils en écheveaux on les fait passer deux ou trois fois dans un bain d'huile de lin bouillante rendue siccative à l'aide de litharge; puis, quand le câble

est fabriqué et relié de mètre en mètre par des ligatures provisoires, on y applique une nouvelle couche d'huile de lin, rendue siccative comme pour les couches appliquées par immersion. Dans cet état, les câbles sont conservés sous un hangar, en les préservant des chocs, qui, en enlevant le vernis, rendent l'oxydation facile.

Pour mettre les câbles en place, on jette un petit câble allant d'une pile à l'autre; puis, à l'aide de petits supports fixés au grand câble et portant des poulies qui roulent sur le petit câble, on fait avancer le grand câble en le tirant par son extrémité, à l'aide d'un treuil établi sur la pile opposée, jusqu'à ce qu'il soit dans sa position définitive.

Les tiges de suspension du tablier sont en fer forgé lorsqu'on emploie des chaînes; avec les câbles en fil de fer, on peut les exécuter en fil de fer, mais ordinairement on les établit en fer; elles sont plus faciles à fabriquer, et on est plus maître d'en régler la longueur de manière à donner un bombement convenable au plancher lors de sa pose. Les tiges en fil de fer, sans exiger autant de soins et sans être aussi difficiles, se fabriquent par les mêmes procédés que les câbles; on les enveloppe également de ligatures; elles sont habituellement en fils des nos 17 ou 18.

M. Endrès, dans son mémoire cité page 922, rapporte un mode de fabrication des câbles sur place, qu'il a mis en usage dans la construction du pont de Beaumont-sur-Sarthe, et dont l'idée première est due à M. Chaley, constructeur distingué du beau pont de Fribourg et d'un grand nombre d'autres.

Ce mode, dit M. Endrès, se prête merveilleusement à l'établissement des câbles fil par fil et à la place même qu'ils doivent occuper, de sorte que toutes les difficultés inhérentes à la confection en chantier, au transport, au levage et à la pose sont éludées : il consiste à mettre en communication, à travers chaque culée, les parties inférieures des deux puits d'amarre, par une galerie qui permet de réunir deux à deux les extrémités des câbles de chaque tête du pont, et de les attacher l'une avec l'autre au lieu de les amarrer isolément; ou mieux encore, et c'est en cela que consiste le plus grand avantage de ce système, il permet de former fil par fil un ou plusieurs câbles sans fin qui passent d'une tête à l'autre à travers la galerie dont le plafond s'arrondit et s'appareille en forme de voûte renversée, et qui embrassent les maçonneries des culées dans leurs boucles extrêmes.

Il est facile alors de profiter de cette disposition pour rendre les câbles entièrement et constamment visibles et accessibles, en établissant une communication de cette galerie avec le dehors, soit directement dans les têtes si cela est praticable, soit par l'intérieur de la culée en faisant reposer la chaussée sur une voûte longitudinale qui prend pour pieds-droits les murs de tête; on peut dans ce dernier cas diminuer notablement l'épaisseur de ces murs et de celui de la face, attendu

que l'absence du remplissage en terre diminue beaucoup la pression sur le premier et l'annule entièrement sur le dernier (655).

La fabrication des câbles sur place nécessite en général l'établissement préalable d'une passerelle de service destinée à livrer passage d'une rive à l'autre à l'ouvrier chargé du transport du fil et de la ligature des brins bout à bout. Cette passerelle consiste simplement en deux câbles de petit diamètre, disposés sous une flèche peu considérable et supportant à environ un mètre d'intervalle, de manière à servir eux-mêmes de main courante, un étroit plancher soutenu par des fils de fer. Ainsi établi au niveau de la partie supérieure des culées, cet appareil réduit à une main d'œuvre facile et rapide, un travail dont l'extrême difficulté par les moyens ordinaires imposait matériellement une limite très-rapprochée à la portée des ponts suspendus.

Ce nouveau procédé constitue réellement un progrès précieux, car c'est surtout dans les grandes ouvertures que le système des ponts suspendus met le mieux en évidence les avantages qu'il présente sous le rapport de la facilité, de la promptitude et de l'économie d'exécution.

M. Endrès pense que dans toutes les circonstances où une voie de communication aurait à franchir une vallée profonde, on ne devrait pas hésiter à construire un pont suspendu de 5, 6, 7, ou 8 cents mètres d'ouverture, pourvu toutefois que les versants de la vallée se trouvent naturellement disposés de manière à permettre d'établir la partie inférieure des supports bien-au-dessus du point le plus bas des câbles; car sans cette condition l'obstacle naîtrait de l'impossibilité de construire des supports de 50, 60, 70 ou 80 mètres de hauteur. Le pont de Fribourg, qui est le plus grand qui existe, a $265^{m},26$ entre les appuis.

654. *Piliers.* Les chaînes ou câbles passent sur des piliers élevés sur les culées, puis s'infléchissent au delà de ces piliers pour pénétrer dans des massifs de maçonnerie reliés à la culée et auxquels on les fixe solidement.

Le prolongement $s$A, figure 33, planche III, de la chaîne, au delà du pilier, s'appelle *chaîne de retenue;* il est soumis à la tension maximum T de la chaîne au point $s$ (647) et le pilier doit avoir une section suffisante pour résister à la résultante de ces deux tensions égales.

La tension de la chaîne au point $s$ est dirigéee suivant la tangente à la courbe en ce point, c'est-à-dire suivant $s$B, qui rencontre l'axe des $y$ au point B donnant OB=OC. Cela n'est rigoureusement vrai qu'autant que la partie courbe du câble se prolonge jusqu'au point $s$, et comme il est rare que ce cas se réalise, il vaut mieux dire que la tension T est dirigée suivant la tangente à la courbe au point pour lequel on a défini $f$ et $d$ au n° 646, et que cette tangente rencontre l'axe des $y$ à une distance du sommet égale à $f$ (page 922).

Comme ordinairement les deux angles B$s$D et A$s$D sont égaux, il s'ensuit que la résultante de la tension T de la chaîne de suspension et

de celle égale de la chaîne de retenue est dirigée suivant la verticale $s$D; d'où, T étant représenté par $s$B, cette résultante le sera par $s$D, et en la désignant par R, on aura

$$R : T = sD \text{ ou } 4f : sB \text{ ou } \sqrt{d^2+4f^2}, \text{ d'où } R = \frac{4fT}{\sqrt{d^2+4f^2}}.$$

Remplaçant dans cette formule T par sa valeur (647) il vient

$$R = 2pd;$$

ainsi le pilier est chargé d'un poids égal à 2 fois celui de toute la portion de système, tablier, câble et surcharge, comprise depuis le point bas du câble jusqu'au pilier considéré.

Les mêmes lettres ont les mêmes significations qu'au n° 646.

Connaissant la valeur de R, il sera facile de calculer la section à donner aux piliers pour y résister (218).

Lorsque l'angle A$s$D n'est pas égal à l'angle B$s$D la résultante R partage encore l'angle A$s$B en deux parties égales, et elle n'est plus par conséquent dirigée suivant la verticale $s$D; alors R se décompose en deux forces : l'une verticale, dirigée suivant $s$D et qui agit par compression sur le pilier; l'autre horizontale, qui tend à renverser le pilier et à le faire glisser sur sa base ou sur ses joints. Le pilier doit avoir des dimensions suffisantes pour résister à l'une et à l'autre de ces composantes.

Quelquefois un pilier sépare deux travées dont les câbles sont fixés à son sommet. Dans ce cas, la tension de chaque câble se décompose en deux forces, l'une verticale et l'autre horizontale; les forces verticales s'ajoutent, et le pilier doit résister à leur somme sans s'écraser; les forces horizontales se retranchent, et leur différence ne doit pas être suffisante pour faire tourner le pilier autour de l'arête extérieure de sa base, c'est-à-dire que le moment de cette différence, pris par rapport à cette arête, doit être moindre que celui du poids du pilier, augmenté de celui de la somme des composantes verticales des tensions, pris également par rapport à cette même arête. Il ne faut pas non plus que cette force horizontale soit suffisante pour faire glisser le pilier sur sa base ni sur aucun de ses joints. Pour éviter ce dernier glissement, on relie toutes les assises du pilier par quatre tirants en fer qui s'élèvent du bas du pilier jusqu'au sommet, où ils se boulonnent sur la plaque de fonte qui porte les chevalets auxquels sont fixés les câbles.

Il faut aussi que la résultante des tensions ne soit pas suffisante pour faire rompre les piliers suivant sa direction. Pour éviter cela, quand cette résultante est considérable, il convient de relier entre elles les pierres d'une même assise par des crochets et des ancres horizontales. La section du pilier étant suffisante pour résister à la composante ver-

ticale des tensions, on peut dire que l'on n'a pas à craindre cette rupture oblique suivant la direction de la résultante, tant que cette direction ne passe pas hors de la base du pilier.

Pour évaluer la composante horizontale qui tend à renverser le pilier, on suppose que l'une des travées du pont est chargée de 200 kilog. par mètre carré de tablier, et qu'aucune surcharge ne repose sur l'autre ; ce cas est le plus défavorable, mais il se présente. La pierre des piliers ne doit pas travailler sous une pression supérieure à celle indiquée n° 218, et même dans quelques ponts, au pont de Fribourg, par exemple, on a réduit la charge à 1 kilog. seulement par centimètre carré ; dans les ponts construits avec de la pierre ordinaire, les voussoirs travaillent souvent à 20 kilogrammes par centimètre carré.

Dans quelques ponts, on a substitué aux piliers en pierre des bielles en fonte placées chacune dans la direction de la résultante des tensions des deux parties du câble qui s'infléchit sur son sommet.

**635.** *Massifs d'amarrage.* La chaîne de retenue, arrivée au sol, y pénètre en ligne droite, ou ordinairement en s'infléchissant de nouveau afin de diminuer la longueur du massif d'amarrage, qu'alors on relie facilement à la culée de manière à ne faire qu'un massif de leur ensemble. Dans les ponts où les culées avancent de manière à être isolées, le plus souvent chaque massif d'amarrage se relie à la culée par un des murs en retour ; par cette disposition, la maçonnerie de ces murs est doublement utilisée.

Quelle que soit la forme du massif, son ensemble doit être suffisant pour résister à la tension T qui le sollicite suivant A*s* (fig. 33, pl. III).

Supposons d'abord que la chaîne de retenue ne s'infléchisse pas au point A, et soit $\beta$ l'angle que fait *s*A avec la verticale et P le poids du massif. La tension T se décompose en deux forces : l'une, T cos $\beta$, laquelle, étant verticale, tend à soulever le massif de maçonnerie, et par conséquent à diminuer la pression et par suite le frottement de celui-ci sur sa base ; l'autre T sin $\beta$, laquelle étant horizontale, tend à faire glisser le massif sur sa base.

Pour que la massif ne soit pas soulevé, il faut que l'on ait

$$T \cos \beta < P.$$

Pour que le massif ne glisse pas, on doit avoir

$$T \sin \beta < 0{,}76\ (P - T \cos \beta).$$

De plus, la tension T doit être moindre que la résultante, suivant sa direction, du poids P et de la résistance au glissement 0,76 (P — T cos $\beta$).

0,76 est le coefficient de frottement du massif sur sa base ; on doit négliger l'adhérence des mortiers, ceux-ci n'étant ordinairement pas entièrement secs lors de l'essai du pont (62 et 641).

Lorsque la chaîne s'infléchit, il faut placer le point d'inflexion dans le sol, afin de diminuer la tendance des assises supérieures à glisser. Le massif doit satisfaire aux conditions du cas précédent, et de plus la résultante des tensions des parties $As$ et AE de la chaîne de retenue doit être insuffisante pour renverser la culée. Ordinairement la direction de cette résultante, qui divise l'angle des deux parties $As$ et AE en deux parties égales, passe dans la base de la culée et ne tend pas à renverser le massif, si toutefois la fondation est assez solide pour que l'arête de la culée n'y pénètre pas.

Quoique la chaîne de retenue soulève une grande partie du massif d'amarrage, il n'en faut pas moins faire la fondation très-solide, parce que le massif étant plus fortement soulevé en des points de sa base qu'en d'autres, les affaissements inégaux sont à craindre.

La partie de câble placée dans le sol étant plus sujette à l'oxydation, il conviendrait de la faire en fer forgé; dans tous les cas, on doit avoir soin de la couvrir de vernis. Comme, pour la solidité, on est obligé de faire étroites les cheminées de passage des câbles, et que par suite on ne peut aller vérifier l'état de ceux-ci, il convient de remplir les cheminées de chaux grasse réduite en pâte, et de placer une couche de suif sur la surface de la chaux; par cette disposition, tout le métal étant privé du contact de l'air, il se conserve bien. Les cheminées ont de $0^m,08$ à $0^m,12$ de hauteur sur une largeur proportionnée à celle des faisceaux de câbles (653).

La clavette qui retient l'extrémité du câble s'appuie sur une plaque de fonte; cependant des constructeurs la font directement reposer sur la pierre, mais alors il faut avoir bien soin de proportionner ses dimensions de manière qu'elle n'écrase pas la pierre sur laquelle elle est placée. Il faut avoir soin d'éviter de reposer la plaque de fonte ou la clavette sur du bois, dont la prompte pourriture amènerait la chute du pont. On ménage dans le massif une cheminée verticale, qui permet d'aller constater à volonté l'état de la clavette d'amarrage. Une petite chambre réservée en dessous de la clavette permet d'y faire les réparations qui peuvent être nécessaires.

656. *Planchers.* Les planchers reposent sur des poutres, ordinairement en bois, supportées à chaque extrémité par une tige; ces poutres sont espacées de $1^m,25$ à $1^m,50$ environ. La partie de tablier qu'elles supportent et la surcharge provenant des plus fortes voitures guident pour en fixer les dimensions; le cas le plus défavorable est celui où on suppose la moitié du poids de la partie de tablier qui y correspond appliquée en son milieu, ainsi que celui de la plus forte voiture (224). Il convient de remarquer que le plancher reporte, dans ce cas défavorable, une partie de la charge sur les poutres voisines.

Toutes les poutres sont reliées entre elles par quatre longrines, qui servent en même temps à surhausser les trottoirs, et par les madriers

du premier plancher. Des contrevents en fer ou en bois empêchent le système de faire parallélogramme dans le sens horizontal.

Dans quelques ponts on a recouvert la face supérieure des poutres d'une plaque de zinc mince, qui empêche la pénétration de l'eau et contribue à la conservation du bois.

Les madriers du premier plancher ont de $0^m,10$ à $0^m,12$ d'épaisseur, et on les espace de quelques centimètres pour que l'air circule le mieux possible entre eux. Le plancher supérieur a $0^m,05$ à $0^m,06$ d'épaisseur; les pièces en sont jointives et placées suivant la largeur du pont, afin que les pieds des chevaux y trouvent des appuis. On laisse entre les extrémités des pièces de ce tablier et les longrines qui supportent les trottoirs un jeu de quelques centimètres, afin que les eaux trouvent un écoulement facile.

La largeur d'un pont suspendu dépasse rarement 8 mètres; au delà les poutres exigent des dimensions trop fortes. Sur ces 8 mètres, on prend $4^m,80$ pour la chaussée, ce qui est nécessaire pour que deux voitures se croisent, et le reste est employé en trottoirs. Lorsque le pont est peu fréquenté et d'une faible longueur, on ne donne au passage des voitures que $2^m,20$ à $2^m,40$ et de 1 mètre à $1^m,10$ à chaque trottoir; la largeur d'un tel pont, sur lequel les voitures ne se croisent pas, n'a jamais été de moins de $4^m,40$.

Si une largeur de 8 mètres n'était pas suffisante, on pourrait placer les trottoirs à l'extérieur des tiges de suspension, sauf à supporter, si cela était nécessaire, un côté de chacun d'eux par un câble séparé du faisceau supportant la chaussée et son autre côté.

**637.** *Garde-corps.* Quoique les garde-corps en bois enlèvent de la largeur au pont, il convient de les employer à cause de la rigidité qu'ils communiquent au plancher; c'est aussi pour mieux atteindre ce but qu'on les forme d'une suite de croix de Saint-André. Leur hauteur varie de $0^m,90$ à 1 mètre.

**638.** *Appareils employés pour l'exécution des travaux sous l'eau.* Pour enlever du fond de l'eau une pierre ou tout autre objet analogue, on se sert d'une tenaille dont l'axe d'articulation des mâchoires est fixé à l'extrémité d'un long manche. Les mâchoires se prolongent au-dessus de l'articulation par des tiges formant avec d'autres un parallélogramme dont tous les côtés sont égaux et articulés. Une corde fixée au sommet supérieur du parallélogramme, et s'élevant le long du manche jusque hors de l'eau, permet, en la tirant, de serrer entre les mâchoires de la tenaille l'objet qui s'y trouve, et que l'on peut alors élever à la surface de l'eau.

Pour creuser le sol sous l'eau on fait usage soit de la drague à main, soit de la drague à chapelets munis de hottes à griffes, laquelle est mue par des animaux ou par la vapeur.

La *cloche à plongeur*, employée pour retirer du fond de l'eau des

corps qui y sont tombés, ou même pour y faire des travaux de démolition ou de construction, consiste en un vase ouvert par le bas, fermé sur toutes les autres faces, et dans lequel des hommes peuvent travailler à des profondeurs considérables sous l'eau.

La cloche de plongeur, telle qu'elle a été perfectionnée par Rennie, et telle qu'elle est encore employée en Angleterre, a à peu près la forme d'un parallélipipède. Sa largeur est de $1^m$,38 et sa hauteur extérieurement est de $1^m$,85 sur $1^m$,72 intérieurement. Ses dimensions vont un peu en augmentant depuis le haut jusqu'en bas. On la coule en fonte d'un seul jet, en faisant ses parois assez épaisses pour éviter toute fissure, même en cas d'accident, et pour que son poids soit suffisant pour qu'il ne soit pas nécessaire de la lester pour la submerger quoique pleine d'air. Au sommet de la cloche est pratiquée une ouverture communiquant avec l'intérieur par plusieurs trous, également circulaires, et fermés par autant de soupapes en cuir s'ouvrant de haut en bas. Un fort tuyau de cuir vissé sur l'ouverture extérieure s'élève jusqu'à la pompe foulante placée sur l'échafaud ou le bâtiment duquel on manœuvre la cloche; celle-ci est suspendue à de fortes chaînes engagées dans des anneaux en fer emprisonnés dans le corps de la cloche au moment de la fusion.

L'intérieur de la cloche est éclairé à l'aide de 12 lentilles circulaires en verre très-épais, solidement fixées par des écrous et du mastic sur le pourtour de la face supérieure.

La cloche contient aisément deux personnes assises sur des siéges convenablement placés. Le poids total de l'appareil est d'environ 4000 kilog. La pompe foulante qui fournit l'air est ordinairement manœuvrée par 4 hommes. Pour que l'air de la cloche n'ait aucune influence fâcheuse sur la santé des ouvriers, il faut qu'il renferme au plus 4 à 5 pour 100 d'air vicié; pour obtenir ce résultat, la pompe doit renouveler 4 à 5 mètres cubes d'air par heure et par homme. L'air vicié par la respiration étant plus chaud et par suite moins dense que l'air frais, il s'accumule au haut de la cloche, d'où on l'expulse à l'aide d'un robinet.

A mesure que la cloche s'enfonce sous l'eau et que la pression de l'air y devient plus considérable, les plongeurs ressentent dans les oreilles une douleur assez vive, qu'ils font disparaître en opérant dans la bouche, celle-ci et les narines étant bouchées, un mouvement de déglutition, ou en avalant leur salive.

Lorsque l'eau est limpide, la lumière est très-grande sous la cloche. Les signaux sont communiqués le plus souvent par les plongeurs, aux personnes qui manœuvent la cloche, au moyen de coups de marteau frappés contre les parois de celle-ci, et ils n'en exigent généralement qu'un petit nombre.

Pour extraire des pierres qui gisaient au fond du port de Cherbourg

on a fait usage d'une cloche, que son inventeur, M. le docteur Payène, appelle *bateau-plongeur*. Cet appareil, dont la forme se rapproche de celle d'un bateau, est divisé, par des cloisons à peu près verticales, en trois compartiments, dont celui du milieu est divisé en deux chambres par une cloison horizontale garnie d'une porte qui permet aux ouvriers de passer de l'une des chambres dans l'autre; la chambre inférieure est sans fond.

Avant l'immersion, on comprime de l'air dans les compartiments extrêmes, et les plongeurs s'enferment dans la chambre supérieure. Cela fait, on foule de l'eau dans les compartiments extrêmes, dont l'air se rend dans la chambre intermédiaire supérieure, et par suite de l'augmentation de poids due à cette eau, l'appareil s'immerge progressivement. Arrivé sur le fond, on ouvre la porte de la cloison horizontale, l'air comprimé refoule l'eau de la chambre inférieure, et les ouvriers y descendent pour travailler.

On maintient l'air de l'appareil à l'état respirable en le faisant passer, à l'aide d'un fort soufflet, dans une dissolution alcaline. La tuyère de ce soufflet est garnie d'une pomme d'arrosoir, laquelle en divisant l'air en petit filets le met mieux en contact avec la dissolution.

Le *scaphandre*, imaginé par M. Siébe, est un appareil que le plongeur porte lui-même, et qui le laisse assez libre de ses mouvements pour qu'il puisse procéder à des opérations de sauvetage, et même exécuter sous l'eau, à des profondeurs considérables, des ouvrages de construction ou de restauration. Le remplacement de l'air vicié par l'air pur se faisant au moyen d'une pompe fonctionnant avec beaucoup de régularité, l'ouvrier peut facilement rester sous l'eau pendant 3 à 4 heures et même plus.

Le scaphandre a été appliqué pour visiter et construire quelques parties de fondation des piles du pont de Baucaire, sur le Rhône, pour le chemin de fer de Marseille à Nîmes; aux ponts de Cette et de Marseille, on s'en sert fréquemment pour visiter l'état des fondations et y exécuter des réparations. M. Laroque, après avoir fait faire une partie de revêtement en ciment de Vassy, à une profondeur de $4^m,50$ sous l'eau, au fort de la Joliette, pour s'assurer de l'état du travail, a fait lui-même une descente sous-marine, et il reste convaincu que l'on peut tirer un très-bon parti du scaphandre dans l'exécution des grands travaux hydrauliques; il est fâcheux que son prix soit aussi élevé (6500 à 7000 francs).

Le scaphandre se compose :

1° D'une pompe à air contenue dans une caisse de $0^m,60$ à $0^m,80$ de côté, dont le poids est de 125 kilog. environ;

2° D'une autre caisse contenant des souliers plombés, des plaques de plomb et des vêtements de laine, tels que camisoles, caleçons, bas et bonnets;

3° D'un vêtement imperméable en caoutchouc d'une seule pièce, qui

part du milieu du dos et couvre tout le corps en formant un pantalon à bas ;

4° D'une épaulière en métal, dont le collet circulaire porte un pas de vis, et la partie inférieure un système de bandelettes en cuivre qui sert à fixer le haut du vêtement imperméable ;

5° D'un casque en métal, de forme ovoïde, dont la hauteur est de $0^m,35$ et la largeur $0^m,27$. La partie inférieure du casque, à la hauteur du col, est ouverte circulairement, et porte un écrou en métal qui s'adapte au pas de vis de l'épaulière et permet la réunion complète du casque au vêtement imperméable. La face du casque est munie à la hauteur des yeux de deux carreaux fixes en verre fort épais de $0^m,13$ de diamètre ; à la hauteur de la bouche existe aussi un carreau mobile de même diamètre, qui est placé dans un châssis en métal formant le pas d'une vis dont l'ouverture du casque forme l'écrou ; une rainure tient ce verre très-fixe, et on peut très-facilement le retirer, ce qui permet au plongeur de respirer librement sitôt sa sortie de l'eau.

Les carreaux sont préservés par des petites grilles en métal. Le conduit d'aspiration d'air pur et celui de décharge de l'air vicié sont formés à l'intérieur du casque par de petits canaux placés autour des carreaux ; l'air pur arrive par le dessus et derrière la tête ; le casque est muni à cet effet d'un pas de vis qui reçoit l'écrou d'un tuyau en caoutchouc de $0^m,035$ de diamètre, au moyen duquel la pompe envoie l'air pur ; l'air vicié sort par une petite soupape placée sur le derrière du casque et dont la jonction s'opère sans permettre à l'eau de rentrer.

Pour se revêtir du scaphandre il faut procéder comme il suit :

On se revêt d'abord d'une camisole de grosse laine, d'un caleçon et d'une paire de bas de même étoffe, il faut mettre deux paires de bas si la température le requiert ; ensuite on endosse le vêtement en caoutchouc, qu'il faut avoir soin de placer auprès du feu afin qu'il se ramollisse dans le cas où il serait roide ; sans cette précaution, on pourrait couper le caoutchouc. Ces vêtements mis, on pose sur ses épaules un coussin-couronne qu'on fait passer par-dessus la tête, et on passe ensuite la tête dans l'épaulière ou collet du casque, qu'on raccorde au vêtement imperméable, en serrant fortement avec une clef les 13 écrous. Les mains sont entièrement libres, et afin que l'eau ne s'introduise pas par les poignets du vêtement imperméable, on les lie étroitement avec de larges bandelettes en caoutchouc, en ayant bien soin de placer des linges entre la peau et le vêtement ; on met une nouvelle paire de bas par-dessus le vêtement, qui doit être aussi recouvert d'un surtout en toile à navire, dont le but est de le garantir de l'usure qui pourrait résulter du frottement et des chocs.

Le plongeur se garnit ensuite les pieds de forts souliers à semelles de plomb, il se recouvre la tête d'un gros bonnet de laine qu'on doit bien lui appliquer sur les oreilles, ce qui est urgent (il serait même bon de

boucher ces dernières avec du coton). Dans cet état, on lui recouvre la tête du casque, sans placer le verre mobile de face; le casque est vissé sur l'épaulière de manière que le tube à air revienne sous le bras gauche, sur le devant du plongeur; on lui attache autour du corps et sur le devant de l'épaule droite le cordage de signal et de sauvetage. On maintient le tube à air serré contre le corps par une ceinture à laquelle est adapté un étui, contenant un couteau qui sert à trancher ce qui pourrait arrêter ou embarrasser le plongeur; on place des plaques de plomb, l'une sur le devant, l'autre sur le derrière; la corde qui les fixe doit enfiler les brides qui existent sur le casque, et après avoir passé par les poids elle est retenue par devant au moyen d'un nœud coulant.

Sur le ponton ou le quai d'où le plongeur doit descendre, on place le tuyau d'aspiration en forme de serpentin, de manière qu'il ne puisse se rouler et interrompre le passage de l'air; on adapte à la pompe une extrémité du tuyau et l'autre au casque, et on essaye si la pompe fonctionne bien. Lorsque tout est bien disposé, et que le plongeur est prêt à descendre, on visse sur le devant du casque le verre mobile; à partir de ce moment la pompe à air ne doit pas cesser de fonctionner, car quoique le plongeur ne soit pas dans l'eau, il est entièrement privé d'air, puisque celui-ci ne peut plus lui arriver que par le tube du casque.

Avant de descendre dans l'eau, le plongeur fait régulariser le mouvement de la pompe suivant ses besoins, en faisant signe aux pompeurs d'agir plus ou moins vite suivant qu'il n'a pas assez ou qu'il a trop d'air. Le premier cas se fait sentir par l'arrivée des sueurs, des étouffements et des crampes d'estomac; alors la pompe doit fonctionner plus vite; il doit en être autrement si le plongeur ressent de forts sifflements d'oreille et des espèces de frissons.

La descente dans l'eau se fait au moyen d'une échelle fixée au fond par un lest. Les effets qui suivent l'immersion complète du plongeur sont d'abord un très-fort bourdonnement d'oreilles, un assourdissement de tous bruits extérieurs, et une obscurité presque complète, qui cesse au bout de quelques minutes de séjour sous l'eau.

Si le plongeur s'éloigne à une grande distance de l'échelle, il doit y attacher une ficelle qu'il tient à sa main et qui lui permet de retrouver son chemin; il doit se munir aussi d'un levier qui lui sert d'appui, et de plus avoir soin de marcher de préférence à reculons, en tâtant s'il fait obscur; il doit se mouvoir lentement et dans des sens déterminés, afin de ne pas s'embarrasser dans le tube ou le cordon, et aussi pour éviter de briser les verres du casque en les cognant contre quelques pointes dures.

Deux hommes de confiance doivent être placés là où est descendu le plongeur pour observer soigneusement le cordon de signal et le tube de respiration, qui doit toujours être modérément tendu; la surveil-

lance de ces hommes doit être de toute confiance, on ne doit leur permettre aucune conversation qui pourrait distraire leur attention des signaux ou de toute autre circonstance. Si par la corde, qu'ils ne doivent pas quitter, ils sentent la moindre secousse due à une chute ou à tout autre accident, ils doivent haler de suite le plongeur, en veillant à ce qu'il n'y ait aucune interruption dans la pompe. Aussitôt la tête hors de l'eau, le premier soin doit être de dévisser le verre mobile du casque, afin que le plongeur puisse respirer à l'aise.

Les surveillants doivent aussi signaler de temps en temps au plongeur que tout va bien; ce dernier doit leur répondre; dans le cas contraire il faut le haler. Les signaux se font en tirant la corde de sauvetage un certain nombre de fois convenu, en raison de la nature du travail. Le plongeur peut aussi correspondre avec les surveillants en écrivant ce qu'il désire sur une ardoise fixée à l'extrémité d'une corde; les surveillants lui répondent par le même moyen.

Nous terminons ces indications sur le scaphandre en engageant à suivre avec une scrupuleuse attention les indications données par M. Siébe pour l'entretien de ses appareils; car si l'on négligeait de les nettoyer ou de les entretenir quand ils sont en magasin, il en résulterait des avaries qui les mettraient promptement dans l'impossibilité de pouvoir servir.

*Encaissement à revêtir.* Avec cet appareil, on est parvenu à faire, à plusieurs mètres sous l'eau, au moyen du ciment de Vassy, et sans épuisements, des revêtements d'une épaisseur de $0^m,10$ à $0^m,20$, qui ont une parfaite adhérence avec les maçonneries restaurées, et qui présentent un parement droit et uni comme s'ils avaient été faits hors de l'eau avec la truelle.

De l'avis de MM. les ingénieurs qui se sont le plus spécialement occupés des effets produits par l'eau de mer sur les matières qui entrent dans la composition des mortiers hydrauliques (546), et entre autres MM. Vicat et Féburier, le moyen à adopter pour préserver les maçonneries en mortiers douteux consiste à faire, avec le plus grand soin, sur les parements, des revêtements ou des rejointoiements de $0^m,05$ à $0^m,06$ de profondeur, avec des ciments inattaquables par l'eau de mer, tels que ceux de Vassy et de Parker.

L'exécution de ces travaux préservatifs, assez simple pour des constructions neuves en cours d'exécution, présentait, pour la restauration des ouvrages, des difficultés qui se sont aplanies par l'usage du scaphandre et de l'encaissement à revêtir; c'est ce qu'ont démontré les revêtements sous-marins en ciment de Vassy exécutés par M. Gariel dans les ports de la Méditerranée, en France et en Algérie.

L'encaissement à revêtir est formé de deux poteaux en bois, d'une longueur supérieure à la profondeur de l'eau, et espacés d'environ $2^m,00$ d'axe en axe. Ces poteaux sont réunis à leur partie inférieure par

une traverse horizontale, et le long de chacun d'eux est fixée une tige en fer de $0^m,015$ de diamètre. La paroi de l'encaissement destinée à former le parement du revêtement se compose d'une série de madriers en chêne de $0^m,035$ d'épaisseur et $0^m,25$ à $0^m,30$ de largeur, dont chacun est garni à ses extrémités d'un piton à vis, lequel, en glissant le long des tiges en fer, fait que tous les madriers se superposent sur toute la hauteur des poteaux en formant une surface unie.

Avant de poser l'encaissement, on procède à la préparation des surfaces à revêtir ou des parois des affouillements à remplir, c'est-à-dire qu'on les dégrade ou qu'on les pique au vif pour les dépouiller des mousses et lichens. Cette opération s'exécute au moyen de longues barres à mine appointées, et de brosses de chiendent ou de balais adaptés à des manches assez longs pour atteindre le fond de l'eau. On dépouille ensuite le pied de la paroi des résidus du dégradage ou des autres matières qui y sont accumulés, en se servant de râteaux en fer ou de dragues à main.

On place alors la ferme de l'encaissement, qui descend verticalement dans l'eau, la traverse inférieure étant lestée au moyen de moellonnaille maintenue par des planches fixées contre les poteaux, du côté opposé au revêtement à exécuter. On amène la charpente de manière que quand les madriers seront en place leur face intérieure coïncide avec le parement que l'on veut obtenir ; alors on la fixe solidement dans cette position au moyen d'amarres; puis, si le parement a partout la même épaisseur, on place tous les madriers de l'encaissement; dans le cas contraire, ou s'il y a des vides à remplir, on ne pose qu'un ou deux madriers à la fois, et on fait au fur et à mesure la partie correspondante du revêtement.

Le remplissage entre l'encaissement et le mur, c'est-à-dire l'exécution proprement dite du revêtement, se fait au moyen de la pelle à couler, instrument particulier à ce genre de travail, et qui est formé d'une lame de tôle de $0^m,45$ de côté, qui se relève sous un certain angle à partir d'environ la moitié de sa longueur, et qui est garnie d'une joue en retour d'équerre le long d'une arête longitudinale. Ce relèvement de l'extrémité de la joue suffit pour maintenir sur la pelle la matière que l'on descend dans l'encaissement. La saillie de la joue plus l'épaisseur du manche doit être égale à l'épaisseur la plus faible du revêtement, afin que la pelle puisse circuler partout avec la plus grande charge possible. La pelle à couler est garnie d'un pilon, dont le manche est aussi long que celui de la pelle, lequel doit sortir de $1^m,50$ au moins de l'eau lorsqu'on travaille au fond de l'encaissement.

Ayant placé la pelle horizontalement, l'ouvrier la garnit de mortier de ciment et de cailloux concassés, en couvrant, sur toutes les faces vues, cette espèce de béton par un enduit de $0^m,02$ d'épaisseur arasant la joue de la pelle. Ce garnissage de la pelle doit se faire avec rapidité,

afin que l'immersion ait lieu au moment où le ciment commence à prendre, ce qui arrive parfois après une ou deux minutes.

La pellée étant bien régulièrement préparée, on la descend verticalement et avec précaution entre l'encaissement et le mur, en faisant glisser le manche contre les madriers; arrivée à la profondeur voulue, l'ouvrier incline le manche vers lui de manière à rendre l'extrémité de la pelle à peu près verticale, et soulevant légèrement la pelle, le contenu s'en détache facilement; avec le pilon on le régularise et on le fait adhérer à la paroi du mur et à la partie de parement déjà faite. Le pilon doit faire le nécessaire sans délayer le mortier; sa manœuvre étant faite avec beaucoup de précaution, elle ne produit qu'une laitance presque insensible avec un mortier très-gras, de trois parties de ciment de Vassy pour deux de sable.

Quand l'encaissement est garni jusqu'au niveau de l'eau, on le déplace pour le reposer à la suite et exécuter une nouvelle portion du revêtement.

Malgré les difficultés d'exécution, avec des ouvriers habiles, soigneux et exercés comme ils doivent l'être, les revêtements en ciment de Vassy se font avec beaucoup de célérité. Ainsi, pour le revêtement des fondations de la batterie Aljefna, à Alger, un atelier composé de 6 dégradeurs, 2 plongeurs, 3 poseurs, 3 gâcheurs de ciment et 2 manœuvres, en tout 16 ouvriers, faisait en moyenne deux longueurs d'encaissement par journée de 12 heures; la profondeur d'eau était de $2^m,00$ à $2^m,50$, ce qui formait une surface de 5 à 6 mètres carrés pour les deux encaissements.

## CANAUX.

**659.** *Division des canaux.* Un canal construit latéralement à une rivière, que la pente, les sinuosités du lit et le régime des eaux ne permettent pas de rendre économiquement navigable, prend le nom de *canal latéral.* Un canal destiné à établir une communication entre deux cours d'eau navigables est appelé *canal à point de partage.*

### CANAL LATÉRAL.

**660.** *Tracé.* Un canal latéral a sa pente dans le même sens que le cours d'eau qu'il longe, et il suit constamment la même vallée. Sa position doit être choisie telle, qu'il conserve l'eau nécessaire à la navigation, que le cours de la rivière ne puisse pas le dégrader, et que les dépenses en acquisitions de terrain et en travaux soient les moindres possibles.

Lorsque le sol de la vallée est de gravier plus ou moins pur, comme cela arrive souvent, ce sol étant très-perméable, on doit tâcher de placer le canal sur un sol végétal, en se rapprochant des coteaux; il est évident que l'on doit chercher à l'adosser à celui des coteaux qui est le moins abrupte, le moins couvert d'habitations, celui dont le sol est le moins perméable et le plus facile à travailler. Il faut éviter de faire passer un canal d'une rive sur l'autre, cette disposition entraînant dans des inconvénients pour la navigation et des dépenses considérables de construction.

Lorsqu'on établit un canal sur un sol graveleux couvert d'une couche de terre végétale, il faut avoir soin de ne pas enlever toute cette dernière, qui est plus ou moins imperméable; on ferait des emprunts de part et d'autre de l'emplacement du canal pour établir les digues, en ayant soin de placer les terres dans les parties en contact avec l'eau, et le gravier derrière ces terres.

La quantité d'eau dépensée dans un canal devant être la plus faible possible, il faut éviter de donner écoulement à l'eau. Aussi doit-on composer le canal de parties horizontales placées l'une à la suite de l'autre, à des étages différents, afin de racheter la pente du terrain, et d'éviter les grands travaux de construction en se rapprochant le plus possible de la surface du sol. On maintient l'eau à un niveau convenable dans ces différentes parties du canal à l'aide de portes d'écluses, et, afin de dépenser le moins d'eau possible au passage d'un bateau d'un bief dans un autre, on place dans le bief inférieur une seconde porte d'écluse, éloignée de la première d'une distance au moins égale à la longueur du bateau. La partie de canal ainsi comprise entre deux portes prend le nom de *sas*. En ouvrant la porte d'amont, le niveau de l'eau s'établit dans le sas et le bief supérieur, et permet de faire passer un bateau de ce bief dans le sas; ouvrant ensuite la porte d'aval, l'eau dans le sas descend jusqu'au niveau du bief d'aval, et alors le bateau passe dans ce bief.

Pour faire passer un bateau d'un bief dans le bief supérieur, on procède de la même manière, mais en commençant d'abord par ouvrir la porte d'aval.

Comme il est impossible d'ouvrir les portes tant qu'il existe une différence de charge considérable sur leurs deux faces, on établit au bas de chacune d'elles une petite vanne, appelée *ventelle*, qui permet d'établir le niveau de l'eau sur les deux faces de la porte avant de l'ouvrir. La queue de la ventelle s'élève jusqu'au haut de la porte, de manière qu'on puisse lui communiquer le mouvement à l'aide d'un cric, d'une vis, ou d'un levier simple; on est revenu à ce dernier moyen, qui demande moins de temps pour la manœuvre que le cric, qui est ordinairement employé, et surtout que la vis, que l'on a à peu près abandonnée (671).

Lorsque le canal est placé sur un sol dont la pente est à peu près uni-

forme, comme cela a lieu dans une vallée, en donnant aux écluses une forte chute, on serait conduit à des dépenses considérables pour creuser l'amont de chaque bief et remblayer l'aval. Quand le canal latéral est adossé à un coteau d'une pente douce, il faut, autant que possible, se placer de manière que les déblais de la *cunette* compensent les remblais des digues, et donner aux écluses la chute la plus convenable, de $2^m,50$ à 3 mètres.

**661.** *Section transversale.* La largeur du fond d'un canal se fait à peu près égale au double de celle des bateaux qui le fréquentent; ainsi, selon que les écluses ont de $5^m,20$ à $6^m,50$ d'ouverture, la largeur du plafond se fait de 10 mètres à 12 mètres. Au pont-canal de Saint-Florentin, sur l'Armance, formé de cinq arches de $5^m,80$ de largeur chacune, la largeur est de $10^m,10$, savoir : $2^m,45$ pour chaque banquette et $5^m,20$ pour le canal; cette dernière dimension est celle des écluses et suffit au passage des bateaux.

La profondeur d'eau est de $1^m,50$ pour plusieurs canaux, et elle est de $1^m,65$ à 2 mètres pour d'autres; dans tous les cas, cette profondeur doit être en rapport avec le tirant d'eau des bateaux qui fréquentent le canal.

Les talus intérieurs sont ordinairement à 1 et 1/2 de base pour 1 de hauteur, et, afin que le batillage de l'eau ne les dégrade pas, le plus souvent on établit sur chacun d'eux, au niveau de l'eau, une petite *risberme* de $0^m,25$ à $0^m,30$, sur laquelle on plante des glaïeuls.

Les chemins de halage ont de 3 à 6 mètres de largeur, selon la nature du sol sur lequel ils sont établis et l'importance des trains halés. Ils sont ordinairement placés à $0^m,50$ au-dessus du niveau de l'eau et quelquefois à $0^m,75$ ou 1 mètre.

**662.** *Alimentation.* Ordinairement l'alimentation d'un canal latéral n'offre aucune difficulté; la prise d'eau se fait dans la rivière qu'il longe, et les ruisseaux tributaires de la rivière réparent de distance en distance les pertes dues aux infiltrations et à l'évaporation. On a cependant quelquefois éprouvé des difficultés; ainsi le canal du Rhône au Rhin, quoique alimenté par une rigole navigable prenant 20 mètres cubes d'eau par seconde dans le Rhin, n'a pendant longtemps offert qu'une navigation incommode. Cela tient à ce que le canal est creusé sur un sol de gros gravier très-perméable; mais comme on introduit une eau boueuse, les pertes de la rigole ont diminué de jour en jour.

### CANAUX A POINT DE PARTAGE.

**663.** *Tracé.* Le tracé d'un canal à point de partage exige une étude approfondie, soit pour son alimentation, soit pour déterminer le point

bas de la chaîne de montagnes qu'il doit traverser; c'est en ce point bas qu'il y aura le plus de chances de pouvoir se procurer les eaux nécessaires à la navigation. C'est d'après les considérations posées au n° 595 que l'on détermine le point bas.

Les sources d'eau se trouvant toujours à une certaine profondeur au-dessous de la surface du sol, ce n'est que par des tranchées ou même des souterrains que l'on pourra se procurer, au point de partage des deux branches du canal, la quantité d'eau nécessaire à la navigation. Malgré ces souterrains et ces tranchées, sauf le cas très-rare où le point bas se trouve au-dessous d'une assez grande étendue de terrain pour produire des ruisseaux ou des sources abondantes, on est obligé d'accumuler dans des réservoirs les eaux de pluie, afin de pouvoir en disposer pendant les sécheresses.

La dimension de ces réservoirs dépend du volume d'eau à fournir et de la plus ou moins grande rareté des pluies. La quantité d'eau qui afflue dans ces réservoirs dépend de l'étendue du terrain tributaire, des infiltrations, de la vaporisation et de l'absorption par la végétation. Il est impossible de tenir compte de toutes ces circonstances; tout ce que l'on peut faire est d'admettre, avec quelques ingénieurs, que les cours d'eau écoulent les 3/7 du produit annuel des pluies. En France, ce produit annuel est de $0^m,70$; mais il convient d'observer qu'il tombe plus d'eau dans le Midi que dans le Nord, et dans les parties élevées d'un même pays que dans les plaines (616). D'après Gauthey, au canal du Midi, la superficie du terrain dont les eaux se déversent au point de partage est de 18 000 hectares; au canal de Bourgogne, 19 200 hectares; au canal de Briare, 29 700, et au canal du Centre, 30 800.

Le réservoir de Grosbois, canal de Bourgogne, a une capacité de 8 000 000 mètres cubes; sa profondeur est de 15 à 18 mètres. Celui de Saint-Ferréol, canal du Midi, contient 6 956 000 mètres cubes; la plus grande profondeur d'eau y est de $32^m,50$. Ces réservoirs s'obtiennent en barrant, au moyen d'une digue, l'endroit le plus resserré d'un vallon.

**664.** *Quantité d'eau à fournir à un canal.* Cette quantité doit compenser: 1° les pertes par évaporation, 2° par infiltration, 3° par les portes des écluses, 4° celles dues aux passages des bateaux dans les écluses, 5° celles dues au remplissage du canal après la mise à sec par suite des réparations annuelles. Il est évident que c'est surtout pour les parties voisines du point de partage qu'il faut s'assurer que les eaux affluentes compensent les pertes; car, à mesure que le canal descend, les ruisseaux tributaires deviennent plus nombreux et plus considérables.

**665.** *Évaporation.* La quantité d'eau évaporée dépend de la température et de toutes les circonstances atmosphériques; en général on a trouvé qu'elle était de $1^{mc},50$ par année ou de $0^{mc},004$ par jour, par mètre carré de surface d'eau.

**666.** *Infiltration.* On admet que la quantité d'eau absorbée par infil-

tration est double de celle évaporée; au reste cette quantité varie selon la nature du terrain, et, étant considérable à l'ouverture d'un canal, elle diminue chaque année. En rapportant les remblais, il faut avoir soin de labourer la terre sur laquelle on les pose, afin de rendre la liaison complète et diminuer les chances d'infiltration.

Sur un pont-canal, où il faut prendre les plus grandes précautions pour éviter les infiltrations, après le décintrement des voûtes, on les recouvre d'une couche de béton de $0^m,25$ à $0^m,30$ d'épaisseur; mais jusqu'à présent on n'a obtenu un effet tout à fait efficace qu'en dallant le fond et les parois de la cunette en laves de Volvic, et en recouvrant ce dallage de deux couches d'enduit de bitume. Le bon emploi que l'on fait aujourd'hui du ciment romain permet de substituer cette matière au dallage (540).

667. *La perte due aux portes d'écluses* dépend du soin apporté à la construction. Il paraît qu'en général on est au-dessus de la réalité en supposant que cette perte équivaut annuellement à la quantité d'eau que nécessiterait le passage de sept ou huit bateaux.

668. *Perte due au passage d'un bateau.* Lorsqu'un bateau monte, son passage d'un bief dans le bief supérieur oblige de faire passer de ce dernier dans le premier un volume d'eau égal à

$$P + B,$$

P volume d'un prisme ayant la section horizontale du sas pour base et la chute de l'écluse pour hauteur;
B volume d'eau déplacé par le bateau.

Quand au contraire le bateau descend, le volume de l'eau passant d'un bief dans le bief inférieur est $P - B$. Il résulte donc que chaque bateau qui monte une branche du canal pour redescendre l'autre, tire du bief de partage un volume d'eau égal à

$$(P + B) + (P - B) = 2P.$$

Lorsque la navigation est active, après avoir fait passer un bateau d'un bief dans le bief supérieur, on utilise l'eau qui remplit le sas pour faire redescendre un autre bateau. Par cette précaution, la quantité d'eau tirée du bief de partage pour deux bateaux allant dans un sens différent n'est que 2P, ou P par bateau.

Si le bateau remontait vide pour prendre charge au point de partage, à son entrée dans le bief de partage il dépenserait un volume d'eau égal à $P + b$, $b$ étant le volume d'eau déplacé par le bateau à vide; pour sortir du bief, le volume d'eau absorbé serait $P - B$; d'où il résulte que le passage du bateau dans le bief aurait absorbé un volume d'eau égal à $2P + b - B$, volume qui est d'autant plus petit que B est plus grand et

que $b$ est plus petit. Ce cas favorable à l'économie de l'eau ne peut que bien rarement se présenter dans la pratique.

Il est arrivé quelquefois que l'on a été obligé, par suite d'une pente considérable du terrain, de placer plusieurs sas l'un à la suite de l'autre. Pour monter ces sas, il faut autant de prisme P d'eau qu'il y a de sas, plus un volume B; ainsi, à Fonserane, près de Béziers, où il y a sept sas, le passage d'un bateau montant absorbe un volume d'eau égal à $7P+B$, et celui d'un bateau descendant, un volume égal à $P-B$. Quand tous les sas sont vides, ce qui a lieu ordinairement, il faut encore ajouter à ces dépenses le volume d'eau nécessaire pour faire flotter le bateau dans le premier sas supérieur. Cette disposition des sas accolés est celle qui absorbe le plus d'eau et exige le plus de temps.

**669.** La cinquième dépense d'eau est facile à calculer, puisqu'elle est égale à la capacité du bief de partage et des biefs placés en amont des premières prises d'eau sur les deux versants.

**670.** *Construction des sas.* La longueur et la largeur d'un sas doivent être proportionnées aux dimensions des bateaux qui y circuleront. Quant à sa profondeur, elle comprend la hauteur de son couronnement au-dessus du niveau des eaux dans le bief d'amont, la chute ou différence de niveau de l'eau dans les deux biefs, et le tirant d'eau du bateau dans le sas Le couronnement se tient ordinairement à $0^m,50$ au-dessus du niveau de l'eau. La chute varie de $2^m,50$ à 3 mètres pour les canaux artificiels; pour les écluses que l'on établit sur les rivières, dans les points où la profondeur est insuffisante à la navigation, la chute n'est que de 1 mètre à $1^m,50$ ou 2 mètres.

Une précaution à prendre dans la construction d'un sas, c'est de faire en pierres de taille tout le couronnement et toutes les parties formant des angles verticaux vifs ou arrondis, parce que des petits matériaux ne résisteraient pas aux chocs des bateaux contre ces parties. Ces pierres de taille doivent se relier parfaitement avec les autres parties de la maçonnerie; aussi, pour cela, a-t-on soin que les joints verticaux de chacune d'elles ne correspondent pas aux joints des pierres voisines. Il faut éviter de placer le couronnement en saillie sur le parement des murs ou bajoyers, parce que les bateaux pourraient venir se placer dessous et en ébranler les pierres. La distance d'un joint montant à un angle rentrant ne doit pas être de moins de $0^m,05$ et l'épaisseur horizontale d'une pierre formant un angle saillant doit au moins être égale à la saillie de la pierre.

Afin de pouvoir mettre les sas à sec quand on a à réparer la porte d'amont, on refouille, dans le parement de chacun des bajoyers, en amont de l'écluse d'amont, une coulisse verticale servant à établir un barrage avec des pièces de bois allant d'une coulisse à l'autre. Lorsque les coulisses n'ont que les dimensions ordinaires, $0^m,15$ à $0^m,20$ de profondeur sur $0^m,20$ de largeur, on les refouille ordinairement dans la

pierre; mais pour des dimensions plus grandes, il faudrait, de deux en deux assises, mettre un joint dans la coulisse.

Les *buscs* et les *chardonnets* doivent surtout être faits en pierres de premier choix et de fortes dimensions. Les buscs sont les saillies que l'on établit sur le fond du radier pour y faire contre-buter le bas des portes; on les appareille en voûte, afin qu'ils résistent bien à la poussée. Dans les écluses de petite navigation, la saillie du busc sur le radier peut être de $0^m,20$; mais si l'ouverture de l'écluse est plus considérable, comme les portes très-larges tendent à baisser du nez, pour éviter leur frottement sur le radier, on est obligé de les tenir un peu au-dessus du radier, et par suite d'augmenter la saillie du busc; ainsi, pour les écluses de $5^m,20$, 7 mètres et 8 mètres d'ouverture, cette saillie est de $0^m,25$, et pour les écluses de 8 mètres à 12 mètres et au-dessus, elle est de $0^m,30$. Les pierres formant les buscs doivent pénétrer de $0^m,35$ à $0^m,40$ dans le radier et s'étendre dans toute la largeur du busc, de manière que celui-ci ne soit formé que d'une hauteur de voussoir. Le busc forme mur de chute, et, afin que les eaux ne soient pas projetées contre les murs verticaux, on lui donne du côté d'aval une forme cylindrique verticale concave.

Les *chardonnets* sont destinés à résister à la poussée de l'arête verticale de chacune des portes de l'écluse. Cette arête verticale s'arrondit, ainsi que le refouillement du chardonnet contre lequel elle butte; mais, afin d'éviter le frottement de ces parties l'une contre l'autre dans la manœuvre de l'écluse, on ne place pas les tourillons de la porte dans l'axe du côté arrondi; leur position est telle, qu'il n'y a contact de ce côté contre le chardonnet que quand la porte est appliquée contre le busc, et que sitôt que la porte commence à s'ouvrir, ce contact cesse. Afin que les portes, quand elles sont ouvertes, ne fassent pas saillie sur les parements des murs, on met ceux-ci en retrait d'une quantité égale à l'épaisseur des portes, sur une longueur égale à la largeur de ces portes; c'est seulement en amont de ces retraites, appelées *enclaves*, que l'on fait les coulisses. Entre les enclaves et les coulisses, il faut laisser une épaisseur de pierre suffisante pour résister à la pression que produira un barrage établi dans les coulisses; cette séparation ne doit guère avoir moins de $0^m,60$. La distance de la coulisse au mur en retour qui raccorde le sas avec le bief est encore de $0^m,60$.

A l'exception des chaînes en pierres de taille placées aux points où se trouvent des angles, le parement du reste des murs bajoyers est construit en petits matériaux, si ce n'est cependant pour le mur de chute, où on fait usage de pierres de taille, afin que son parement résiste bien aux chocs des bateaux. Les pierres de taille formant le couronnement de tous les murs doivent avoir des dimensions suffisantes pour résister à la poussée des terres à l'époque des gelées; on leur donne ordinairement $0^m,40$ d'épaisseur sur $0^m,75$ de largeur.

Les parements des bajoyers doivent être exécutés en matériaux durs et non attaquables par la gelée. Ils doivent se relier parfaitement avec la maçonnerie de remplissage placée derrière; on atteint bien ce but en disposant de distance en distance une boutisse de $0^m,70$ à $0^m,80$ ou même 1 mètre de longueur de queue. D'après M. Mary, les parements doivent être en pierre non gélive sur une épaisseur de $0^m,60$ au moins.

Le radier se raccorde avec les fonds des biefs d'amont et d'aval par des plates bandes en pierres de taille faisant voûte du côté du radier de manière à le défendre. Les voussoirs formant ces plates-bandes ont de $0^m,80$ à 1 mètre de longueur, selon que le sas a une largeur de $5^m,20$ à $6^m,50$ et même au delà.

Dans le sas, il convient de faire le radier légèrement concave, afin de le rendre plus propre à résister à la sous-pression de l'eau quand on vide le sas. Les parties de radier placées dans les chambres d'amont et d'aval, et celles extérieures à ces chambres, sont planes.

Ordinairement, pour plus de solidité on exécute en pierre de taille la partie de radier située sous les murs de chute, ainsi que celles placées dans les chambres des portes.

671. *Portes d'écluses.* Elles sont à deux vantaux symétriques butant l'un contre l'autre, et s'appuyant contre les buscs et les chardonnets. On les fait en bois, avec quelques ferrures pour les consolider; en fonte, bois et fer forgé; en fonte, bois et tôle, ou encore en fonte et bois.

En France, les portes sont le plus habituellement en bois; ce sont les moins chères, sous le point de vue des dépenses d'exécution. Au barrage éclusé du petit bras de la Seine, à Paris, les parois des portes sont formées d'une série de demi-cylindres en tôle, rivés entre eux dans toute leur longueur, et placés horyzontalement et de manière que leur convexité se trouve vers l'amont.

Chaque vantail en bois est formé de deux poteaux : l'un, dit *poteau tourillon* parce qu'il porte les pivots, s'applique contre le chardonnet; l'autre, appelé *poteau busqué* parce qu'il vient s'appuyer ou busquer, par une face inclinée au plan du vantail, contre le poteau de même nom de l'autre vantail. Ces deux poteaux sont reliés entre eux par des entretoises horizontales supportant la pression de l'eau, et dont le nombre dépend de la hauteur de la porte; c'est contre ces entretoises que l'on fixe les madriers jointifs formant le bordage de la porte.

On tient les poteaux à $0^m,05$ ou $0^m,06$ du radier, afin qu'ils ne l'atteignent pas dans leur mouvement, et on les élève à $0^m,20$ ou $0^m,25$ au-dessus de l'eau, quand la porte est manœuvrée par une crémaillère circulaire; quand la porte est manœuvrée à l'aide d'un grand levier qui réunit le haut des poteaux et fait en partie équilibre au poids de la porte, les poteaux s'élèvent à une certaine hauteur au-dessus des bajoyers.

L'entretoise supérieure se place à $0^m,10$ environ au-dessus du niveau des eaux navigables, et celle inférieure à $0^m,10$ au-dessus du radier. Quant aux entretoises intermédiaires, on les place de manière que la pression que chacune d'elles supporte soit proportionnée à ses dimensions.

Pour évaluer la pression que supporte chaque entretoise, il convient de remarquer que la pression aux divers points de la hauteur d'une porte noyée seulement sur une face est proportionnelle à la hauteur d'eau au-dessus de ces divers points; d'où il résulte que la pression totale sur la porte peut être représentée par la surface du triangle ABC, figure 34, planche III, ayant pour hauteur la profondeur de l'eau contre la porte, et pour base la même profondeur, qui est proportionnelle à la pression sur les points les plus bas de la porte : ainsi, H étant la profondeur d'eau, la pression totale sur chaque unité de largeur de porte est $H \times \frac{H}{2} = \frac{H^2}{2}$.

La pression moyenne qui s'exerce sur tous les points de la porte est $\frac{H}{2}$, et c'est à cette pression moyenne que doit pouvoir résister l'ensemble des entretoises. Il convient de remarquer qu'il ne suffit pas que l'ensemble des entretoises puisse résister à cette pression, mais qu'il faut aussi les espacer de manière que chacune d'elles supporte la même charge (cela suppose qu'elles ont les mêmes dimensions). On aura la position de chaque entretoise en divisant le triangle ABC en autant de parties équivalentes qu'il y a d'entretoises, par les droites *de*, *fg*, *hi* parallèles à la base, et en plaçant les entretoises à la hauteur du centre de gravité des trapèzes et du triangle formés par ces parallèles (*Int.*, 1248 et 1445).

Appelant $h_1$, $h_2$, $h_3$, ..... les distances des parallèles *de*, *fg*, *hi*.... au-dessous du point A, et $n$ le nombre des entretoises ou des divisions de AB, on a respectivement $h_1^2 = H^2 \frac{n-2}{n-1}$, $h_2^2 = H^2 \frac{n-3}{n-1}$, $h_3^2 = H^2 \frac{n-4}{n-1}$, etc.

C'est à la hauteur des centres de gravité des trapèzes formés par les lignes CB, *de*, *fg*.... qu'il faut placer les entretoises, et la surface de chacun de ces trapèzes représente la pression que supporte chacune des entretoises. Dans la pratique, comme on est obligé de placer une entretoise au-dessus et au-dessous de la porte, on est forcé de s'écarter un peu des positions déterminées par la théorie pour les entretoises. La marche précédente est également celle à suivre pour fixer les positions des cercles des grandes cuves.

Si les entretoises étaient également espacées, on pourrait, sans erreur sensible, déterminer leurs dimensions en supposant que la pression que

supporte chacune d'elles est représentée par la demi-somme des surfaces des trapèzes inférieur et supérieur. (Cette demi-somme représente la pression sur chaque unité de longueur d'entretoise) (225).

Quant à la pression produite par l'eau, les entretoises inférieure et supérieure travaillent moins que les entretoises intermédiaires; cependant, comme elles forment le cadre de la porte et qu'elles sont entaillées pour recevoir les abouts des madriers formant le bordage, leurs dimensions sont supérieures à celles des autres.

Si la porte était noyée sur les deux faces au-dessous du point B, la pression sur la face d'aval détruirait l'augmentation de pression sur la face d'amont, et l'excès de pression sur chacun des éléments de porte inférieurs au point B serait constant et égal à BC; d'où il résulterait que la pression totale de l'eau, pour rompre les entretoises, serait représentée par la surface du triangle ABC, plus la surface d'une rectangle ayant BC pour base, et pour hauteur la distance de l'arête inférieure de la porte au-dessous du point B (234).

Autrefois on reliait les entretoises entre elles et aux poteaux par une pièce inclinée, appelée *bracon*, s'étendant du haut du poteau busqué au bas du poteau tourillon. Ce bracon était formé de deux parties; l'une placée du côté d'amont et noyée dans le bordage, et l'autre du côté d'aval et formée de plusieurs morceaux séparés à leurs extrémités par les entretoises. Chaque morceau était relié à la pièce d'amont par deux boulons et assemblé à embrèvement dans les entretoises ou les poteaux. Les madriers formant le bordage de la porte étaient disposés en décharge parallèlement au bracon, et cloués sur les entretoises et dans les feuillures faites pour recevoir leurs extrémités dans les poteaux et les entretoises inférieure et supérieure. On remplace maintenant le bracon par un tirant en fer allant du haut du poteau tourillon au bas du poteau busqué. Une moufle à coins, que porte ce tirant, permet de le raccourcir, de relever le poteau busqué et d'éviter les affaissements de la partie antérieure de la porte. Ce tirant permet de placer verticalement les madriers formant le bordage.

Les *ventelles*, ou petites vannes destinées à remplir et vider les sas, se placent, une sur chaque vantail, entre deux potelets destinés à former les joues de l'ouverture et s'étendant sur tout l'intervalle des deux entretoises inférieures. Ces potelets se fixent par des boulons aux coulisses placées sur le bordage pour recevoir la ventelle; quand on assemble ces potelets aux entretoises, on ne doit entailler que légèrement ces dernières, et du côté d'amont, c'est-à-dire sur leur face en contact avec le bordage, afin de diminuer le moins possible eur résistance.

Les ventelles peuvent être en bois, ou en tôle, ou en fonte; celles en fonte, dressées sur leurs parties frottantes et glissant sur des coulisses en cuivre, sont faciles à manœuvrer et conservent bien l'eau. Chaque

ventelle est placée contre la face d'amont de la porte, ainsi que sa queue.

Afin que la pierre du busc n'éclate pas sous la pression de l'entretoise inférieure, il convient d'armer l'arête d'amont du busc d'un bon madrier en bois de chêne fixé dans les bajoyers et scellé dans le radier avec des boulons.

Afin que le sable ne s'interpose pas entre la crapaudine et le pivot inférieur, ce qui augmenterait le frottement et accélérerait l'usure, on fixe la crapaudine au poteau et le pivot sur le sol (158).

672. *Fondations.* Les parties essentielles d'une écluse, c'est-à-dire le radier, les buscs et les pieds des bajoyers, devant être construites avec le plus gand soin, on ne doit les exécuter qu'en mettant à sec l'emplacement quelles doivent occuper (561).

673. *Épaisseur du radier.* Un radier peut être considéré comme une solive encastrée à ses deux extrémités sous les bajoyers, et sollicitée uniformément sur toute sa longueur par la différence entre son propre poids qui la sollicite de haut en bas, et celui de la colonne d'eau qui tend à la soulever. Cela suppose le sas vide, et que les eaux des sources ou des biefs environnants transmettent sous toute la surface du radier une sous-pression due à la hauteur du niveau de l'eau dans ces sources ou biefs au-dessus de la surface inférieure du radier Alors, de cette différence de poids et de la formule du n° 225, dans laquelle on prendra pour R la valeur qui convient au mortier, on déterminera l'épaisseur $h$ du radier.

Lorsqu'on établit un batardeau sur une couche de béton coulé, il faut que cette couche de béton soit, comme pour le radier, suffisante pour résister à la sous-pression de l'eau, et que de plus cette sous-pression ne soit pas suffisante pour soulever la couche de béton et les parois du batardeau. Ce soulèvement n'est pas à redouter pour les radiers, à cause du poids considérable des bajoyers.

# SUPPLÉMENT.

---

## 674. *Nomenclature des anciennes mesures* (Int., 218).

1° *Mesures de longueur.* L'unité principale de longueur était la *toise*, qui se subdivisait en 6 *pieds*, le pied en 12 *pouces*, le pouce en 12 *lignes* et la ligne en 12 *points*.

On avait encore la *perche des eaux et forêts*, de 22 pieds de longueur, et la *perche de Paris*, de 18 pieds.

Pour mesurer les étoffes, on se servait de l'*aune*, qui valait 3 pieds 7 pouces 10 lignes et 10 points, ou $1^m,1884$.

Les *mesures itinéraires* étaient la *lieue* et le *mille*.

La *lieue terrestre*, de 25 au degré, vaut 2280,32888 toises. Le méridien terrestre vaut $360 \times 25 = 9000$ lieues, ou 20 522 960 toises.

La *lieue marine*, de 20 au degré, vaut 2850,4111... toises.

La *lieue de poste* vaut 2000 toises.

Le *mille* vaut 1000 toise.

2° *Mesures de surface.* Ce sont : la *toise carrée*, le *pied carré*, le *pouce carré*, la *ligne carrée* et le *point carré;* surfaces carrées qui ont respectivement une toise, un pied, un pouce, une ligne et un point de côté. La toise carrée vaut 36 pieds carrés ; le pied carré, 144 pouces carrés; le pouce carré, 144 lignes, et la ligne 144 points.

L'aune carrée équivaut à un carré d'une aune de côté.

Les *mesures agraires* étaient :

1° La *perche des eaux et forêts*, carré de 22 pieds de côté, ce qui fait 484 pieds carrés, ou $13^{toi.c.},44$ de surface;

2° L'*arpent des eaux et forêts*, qui vaut 100 perches, c'est-à-dire 48 400 pieds carrés, ou $1344^{toi.c.},44$;

3° La *perche de Paris*, carré de 18 pieds de côté, ce qui fait 324 pieds carrés, ou 9 toises carrées de surface;

4° L'*arpent de Paris*, qui vaut 100 perches, c'est-à-dire 32 400 pieds carrés, ou 900 toises carrées.

3° *Mesures de volume.* Ce sont : la *toise cube*, le *pied cube*, le *pouce cube*, etc.; cubes qui ont respectivement une toise, un pied, un pouce, etc., de côté. La toise cube vaut 216 pieds cubes; le pied cube vaut 1728 pouces cubes; le pouce cube, 1728 lignes cubes.

Pour les matières sèches, on se servait du *muid;* le muid de Paris valait 12 *setiers;* un setier, 12 *boisseaux;* un boisseau, 16 *litrons*, ou 13,01 litres (un muid valait donc 144 boisseaux).

Le *muid d'avoine* valait 12 setiers de chacun 24 boisseaux, ce qui faisait 288 boisseaux ;

Le *muid de sel*, 12 setiers de chacun 16 boisseaux, ou 192 boisseaux;

Le *muid de charbon*, 10 setiers de chacun 32 boisseaux, ou 320 boisseaux;

Le *muid de chaux*, 12 setiers de chacun 12 boisseaux, ou 144 boisseaux, comme pour le froment;

Le *muid de plâtre*, 6 setiers de chacun 12 boisseaux, ou 72 boisseaux, moitié de celui de grain ou de chaux;

La *voie de bois* vaut 2 mètres cubes ; la voie de charbon de bois, 2 hectolitres mesurés comble ; la voie de charbon de terre, 30 demi-hectolitres mesurés comble ;

La *corde des eaux et forêts* vaut 3,8391 *stères* ou mètres cubes, et, par suite, le stère vaut 0,2605 corde.

*Mesures de capacité pour les liquides.* Le *muid de Paris* valait 2 *feuillettes ;* la feuillette, 2 *quartauts;* le quartaut, 9 *setiers* ou *veltes ;* le setier, 8 *pintes ;* le muid valait 288 pintes, les liquides supposés sans lie.

La *pinte de Paris* valait 2 *chopines* ; la chopine, 2 *demi-setiers;* le demi-setier, 2 *poissons;* le poisson, 2 *demi-poissons ;* le demi-poisson, 2 *roquilles.*

4° *Division de la circonférence.* La circonférence se divisait en 360 parties égales appelées *degrés* ; le degré, en 60 *minutes;* la minute, en 60 *secondes;* la seconde, en 60 *tierces*, etc.

5° *Mesures de poids.* Ce sont : le *quintal*, qui vaut 100 *livres;* la livre qui vaut 2 *marcs;* le marc, 8 *onces;* l'once, 8 *gros ;* le gros, 72 *grains.*

6° *Unités monétaires.* Ce sont : la *livre tournois*, qui vaut 20 *sous;* le sou, qui vaut 4 *liards*, et le liard, 3 *deniers.*

Les monnaies de cuivre ou de billon étaient les *liards;* les pièces de 2 liards, les pièces de 6 liards, les *sous* de 4 liards, et les *gros sous* de 8 liards.

Les monnaies d'argent étaient les pièces de 6 sous, de 12 sous, de 24 sous, le petit écu de 3 livres, et l'écu de 6 livres.

Les monnaies d'or étaient le *louis* de 24 livres et le *double-louis.*

Les pièces d'argent contenaient 11/12 de leur poids en argent pur et 1/12 de cuivre. Les pièces d'or contenaient 11/12 de leur poids en or pur, 1/24 en argent et 1/24 en cuivre.

7° *Mesures temporaires.* Les mesures temporaires étaient et sont encore le *siècle*, qui vaut 100 *ans;* l'année qui vaut 12 *mois* ou 365 *jours ;* à très-peu près tous les 4 ans, il y a une année qui est bissextile, c'est-à-dire qui contient 366 jours au lieu de 365 ; c'est afin de rétablir l'harmonie entre l'*année civile* et l'*année solaire*, durée d'une révolution entière de la terre autour du soleil ; cette durée est de 365 jours, 5 heures, 48 minutes, 45 secondes (*Int.*, 215).

Le jour vaut 24 *heures ;* l'heure 60 *minutes*, et la minute 60 *secondes.*

Les noms et durées des mois sont : *janvier*, 31 jours ; *février*, 28 jours, et 29 pour les années bissextiles; *mars*, 31 ; *avril*, 30; *mai*, 31 ; *juin*, 30 ; *juillet*, 31 ; *août*, 31 ; *septembre*, 30 ; *octobre*, 31 ; *novembre*, 30 ; *décembre*, 31.

## 675. *Nomenclature des nouvelles mesures* (Int., 208).

1° *Mesures de longueur.* L'unité principale est le *mètre*, qui est égal à la dix-millionième partie du quart du méridien terrestre, c'est-à-dire à 0ᵐ,513074. Le mètre vaut 10 *décimètres;* le décimètre, 10 *centimètres ;* le centimètre, 10 *millimètres*, etc.

Pour évaluer les grandes longueurs, on se sert du *décamètre*, qui vaut 10 mètres ; de l'*hectomètre*, qui vaut 10 décamètres ou 100 mètres ; du *kilomètre*, de 10 hectomètres ou 1000 mètres, et du *myriamètre*, de 10 kilomètres ou 10 000 mètres.

2° *Mesures de surface.* Ce sont : le *mètre carré*, le *décimètre carré*, le *centimètre carré*, le *millimètre carré*. Le mètre carré vaut 100 décimètres carrés ; le décimètre carré, 100 centimètres carrés, et le centimètre carré, 100 millimètres carrés.

Les *mesures agraires* sont l'*hectare*, ou arpent métrique, l'*are* et le *centiare*. L'hectare vaut 100 ares ; l'are, 100 centiares, et le centiare, 1 mètre carré.

3° *Mesures de volume.* Ce sont : le *mètre cube*, le *décimètre cube*, le *centimètre cube*, etc. Le mètre cube vaut 1000 décimètres cubes ; le décimètre cube, 1000 centimètres cubes ; le centimètre cube, 1000 millimètres cubes, etc.

Pour mesurer les liquides on emploie : le *décalitre*, le *litre* et le *décilitre*. Le décalitre vaut 10 litres ; le litre vaut 1 décimètre cube, et le décilitre est le 1/10 du litre.

Pour les matières sèches on fait usage du *kilolitre*, de l'*hectolitre*, du *décalitre* et du *litre*. Le décalitre vaut 10 litres ; l'hectolitre, 10 décalitres ou 100 litres, et le kilolitre, 10 hectolitres ou 1000 litres.

Les bois s'évaluent au *stère* et au *décistère*. Le stère vaut 1 mètre cube ; le décistère est le 1/10 du stère.

Dans les chantiers de Paris, le bois de chauffage se mesure à la voie, qui vaut 2 stères (284).

4° *Division de la circonférence.* La circonférence se divise en 400 parties égales appelées *degrés ;* le degré vaut 100 *minutes ;* la minute, 100 *secondes ;* la seconde, 100 *tierces*, etc.

5° *Mesures de poids.* L'unité fondamentale est le *kilogramme*, qui est le poids d'un décimètre cube d'eau prise à la température de 4° ; c'est la température correspondant à son maximum de densité ; 100 kilogrammes forment le *quintal métrique ;* 10 quintaux ou 1000 kilogrammes valent 1 *millier*, c'est le poids du *tonneau de mer ;* le kilogramme vaut 10 *hectogrammes ;* l'hectogramme, 10 *décagrammes ;* le décagramme, 10 *grammes ;* le gramme, 10 *décigrammes ;* le décigramme, 10 *centigrammes*, etc.

6° *Unités monétaires.* Les unités monétaires sont : le *franc ;* la pièce d'argent de 1 franc pèse 5 grammes ; le franc vaut 10 *décimes*, et le décime, 10 *centimes*.

Les nouvelles monnaies d'argent sont les pièces de 5 francs (40 pèsent 1 kilogramme), de 2 francs, de 1 franc, d'un demi-franc et d'un cinquième de franc.

Les nouvelles monnaies d'or sont les pièces de 5, 10, 20, 50 et 100 francs ; les pièces de 20 fr. pèsent $6^g,45161$, et les autres ont des poids proportionnels à leurs valeurs.

Les nouvelles monnaies d'argent et d'or contiennent 9/10 d'argent ou d'or pur et 1/10 d'alliage.

Les nouvelles monnaies de cuivre sont : le *centime*, la pièce de 2 *centimes*, le *sou* de 5 centimes, et le *gros sou*, de 10 centimes ou 1 décime (*Int.*, 214).

**676.** TABLES DE RÉDUCTION DES ANCIENNES MESURES EN NOUVELLES, ET RÉCIPROQUEMENT.

1° *Toises, pieds et pouces en mètres, et lignes en millimètres.*

| NOMBRES d'unités. | TOISES en mètres. | PIEDS en mètres. | POUCES en mètres. | LIGNES en millimètres. |
|---|---|---|---|---|
| | m. | m. | m. | millim. |
| 1 | 1.949 04 | 0.324 84 | 0.027 07 | 2.256 |
| 2 | 3.898 07 | 0.649 68 | 0.054 14 | 4 512 |
| 3 | 5.847 10 | 0.974 52 | 0.081 21 | 6.767 |
| 4 | 7.796 13 | 1.299 36 | 0.108 28 | 9.023 |
| 5 | 9.745 18 | 1.624 20 | 0.135 35 | 11 279 |
| 6 | 11.694 22 | 1.949 04 | 0.162 42 | 13.535 |
| 7 | 13.643 26 | 2.273 88 | 0.189 49 | 15.791 |
| 8 | 15.592 29 | 2.598 72 | 0.216 56 | 18.047 |
| 9 | 17.541 33 | 2.923 55 | 0.243 63 | 20.302 |
| 10 | 19.490 37 | 3.248 39 | 0.270 70 | 22 558 |
| 11 | 21.439 40 | 3.573 23 | 0.297 77 | 24.814 |
| 12 | 23.388 44 | 3.898 07 | 0.324 84 | 27.070 |
| 13 | 25.337 48 | 4.222 91 | 0.351 91 | 29 326 |
| 14 | 27.286 51 | 4.547 75 | 0.378 98 | 31.582 |
| 15 | 29.235 55 | 4.872 59 | 0.406 05 | 33.837 |
| 16 | 31.184 59 | 5.197 43 | 0 433 12 | 36.093 |
| 17 | 33.133 62 | 5.522 27 | 0.460 19 | 38 349 |
| 18 | 35.082 66 | 5 847 11 | 0 487 26 | 40 605 |
| 19 | 37.031 69 | 6.171 94 | 0.514 33 | 42.861 |
| 20 | 38.980 73 | 6.496 79 | 0 541 40 | 43.117 |
| 21 | 40.929 77 | 6.821 63 | 0.568 47 | 47.372 |
| 22 | 42.878 79 | 7.146 47 | 0.595 54 | 49.628 |
| 23 | 44 827 83 | 7.471 31 | 0.622 61 | 51.884 |
| 24 | 46.776 87 | 7.796 15 | 0 649 68 | 54.140 |
| 25 | 48 725 91 | 8.120 99 | 0.676 75 | 56.396 |
| 26 | 50.674 95 | 8.445 83 | 0.703 82 | 58.652 |
| 27 | 52.623 99 | 8.770 66 | 0.730 89 | 60.907 |
| 28 | 54.573 02 | 9.095 50 | 0.757 96 | 63.163 |
| 29 | 56.522 06 | 9.420 34 | 0.785 03 | 65.419 |
| 30 | 58.471 10 | 9.745 18 | 0.812 10 | 67.675 |
| 31 | 60.420 13 | 10.070 02 | 0.839 17 | 69.931 |
| 32 | 62.369 17 | 10.394 86 | 0.866 24 | 72.187 |
| 33 | 64.318 21 | 10.719 70 | 0.893 31 | 74.442 |
| 34 | 66 267 24 | 11.044 54 | 0.920 38 | 76.698 |
| 35 | 68.216 28 | 11.369 38 | 0.947 45 | 78.954 |
| 36 | 70.165 32 | 11.694 22 | 0.974 52 | 81.210 |
| 37 | 72.114 35 | 12.019 05 | 1.001 59 | 83.466 |
| 38 | 74.063 39 | 12.343 88 | 1.028 66 | 85.722 |
| 39 | 76.012 43 | 12.668 73 | 1.055 73 | 87.977 |
| 40 | 77.961 46 | 12.993 58 | 1.082 80 | 90.233 |
| 41 | 79.910 50 | 13.318 42 | 1.109 87 | 92.489 |
| 42 | 81.859 54 | 13.643 26 | 1.136 94 | 94.745 |
| 43 | 83 808 57 | 13.968 10 | 1.164 01 | 97.001 |
| 44 | 85.757 58 | 14.292 93 | 1.191 08 | 99.257 |
| 45 | 87.706 62 | 14.617 77 | 1.218 15 | 101.512 |
| 46 | 89.655 67 | 14 942 61 | 1.245 22 | 103.768 |
| 47 | 91.604 71 | 15.267 45 | 1.272 29 | 106.024 |
| 48 | 93.553 75 | 15.592 29 | 1.299 36 | 108.280 |
| 49 | 95.502 79 | 15.917 13 | 1.326 43 | 110.536 |
| 50 | 97.451 83 | 16.241 97 | 1.353 50 | 112.792 |
| 100 | 194.903 66 | 32.483 94 | 2.707 00 | 225.583 |
| 1 000 | 1 949.036 59 | 324.839 43 | 27.069 95 | 2255.829 |
| 10000 | 19 490.365 91 | 3248.394 32 | | |

2° *Toises carrées et pieds carrés en mètres carrés.*

*Toises cubes et pieds cubes en mètres cubes.*

| NOMBRES d'unités. | TOISES CARRÉES en mètres carrés. | PIEDS CARRÉS en mètres carrés. | NOMBRES d'unités. | TOISES CUBES en mètres cubes. | PIEDS CUBES en mètres cubes. |
|---|---|---|---|---|---|
| | m. carrés. | m. carrés. | | m. cubes. | m. cubes. |
| 1 | 3.7987 | 0.1055 | 1 | 7.4039 | 0.03428 |
| 2 | 7.5975 | 0.2110 | 2 | 14.8078 | 0.06855 |
| 3 | 11.3962 | 0.3166 | 3 | 22.2117 | 0.10283 |
| 4 | 15.1950 | 0.4221 | 4 | 29.6156 | 0.13711 |
| 5 | 18.9937 | 0.5276 | 5 | 37.0195 | 0.17139 |
| 6 | 22.7925 | 0.6331 | 6 | 44.4233 | 0.20566 |
| 7 | 26.5912 | 0.7386 | 7 | 51.8272 | 0.23994 |
| 8 | 30.3899 | 0.8442 | 8 | 59.2311 | 0.27422 |
| 9 | 34.1887 | 0.9797 | 9 | 66.6350 | 0.30850 |
| 10 | 37.9874 | 1.0552 | 10 | 74.0389 | 0.34277 |
| 11 | 41.7862 | 1.1607 | 11 | 81.4428 | 0.37705 |
| 12 | 45.5849 | 1.2663 | 12 | 88.8467 | 0.41133 |
| 13 | 49.3837 | 1.3718 | 13 | 96.2506 | 0.44560 |
| 14 | 53.1824 | 1.4773 | 14 | 103.6545 | 0.47988 |
| 15 | 56.9812 | 1.5828 | 15 | 111.0584 | 0.51416 |
| 16 | 60.7799 | 1.6883 | 16 | 118.4622 | 0.54844 |
| 17 | 64.5786 | 1.7938 | 17 | 125.8661 | 0.58271 |
| 18 | 68.3774 | 1.8994 | 18 | 133.2700 | 0.61699 |
| 19 | 72.1761 | 2.0049 | 19 | 140.6739 | 0.65127 |
| 20 | 75.9749 | 2.1104 | 20 | 148.0778 | 0.68555 |
| 21 | 79.7736 | 2.2159 | 21 | 155.4817 | 0.71983 |
| 22 | 83.5724 | 2.3214 | 22 | 162.8856 | 0.75410 |
| 23 | 87.3711 | 2.4270 | 23 | 170.2895 | 0.78838 |
| 24 | 91.1698 | 2.5325 | 24 | 177.6935 | 0.82266 |
| 25 | 94.9686 | 2.6380 | 25 | 185.0973 | 0.85694 |
| 26 | 98.7673 | 2.7435 | 26 | 192.5012 | 0.89121 |
| 27 | 102.5661 | 2.8490 | 27 | 199.9050 | 0.92549 |
| 28 | 106.3648 | 2.9546 | 28 | 207.3089 | 0.95977 |
| 29 | 110.1636 | 3.0601 | 29 | 214.7128 | 0.99404 |
| 30 | 113.9623 | 3.1656 | 30 | 222.1167 | 1.02832 |
| 31 | 117.7610 | 3.2712 | 31 | 229.5206 | 1.06260 |
| 32 | 121.5598 | 3.3767 | 32 | 236.9245 | 1.09688 |
| 33 | 125.3585 | 3.4822 | 33 | 244.3284 | 1.13115 |
| 34 | 129.1573 | 3.5877 | 34 | 251.7323 | 1.16543 |
| 35 | 132.9560 | 3.6932 | 35 | 259.1362 | 1.19971 |
| 36 | 136.7548 | 3.7987 | 36 | 266.5401 | 1.23398 |
| 37 | 140.5535 | 3.9042 | 37 | 273.9439 | 1.26826 |
| 38 | 144.3523 | 4.0098 | 38 | 281.3478 | 1.30254 |
| 39 | 148.1510 | 4.1153 | 39 | 288.7517 | 1.33681 |
| 40 | 151.9497 | 4.2208 | 40 | 296.1556 | 1.37109 |
| 41 | 155.7485 | 4.3263 | 41 | 303.5595 | 1.40537 |
| 42 | 159.5472 | 4.4319 | 42 | 310.9634 | 1.43965 |
| 43 | 163.3460 | 4.5374 | 43 | 318.3673 | 1.47394 |
| 44 | 167.1447 | 4.6429 | 44 | 325.7712 | 1.50820 |
| 45 | 170.9435 | 4.7484 | 45 | 333.1751 | 1.54248 |
| 46 | 174.7422 | 4.8539 | 46 | 340.5790 | 1.57675 |
| 47 | 178.5409 | 4.9595 | 47 | 347.9830 | 1.61103 |
| 48 | 182.3397 | 5.0650 | 48 | 355.3871 | 1.64531 |
| 49 | 186.1384 | 5.1705 | 49 | 362.7909 | 1.67959 |
| 50 | 189.9372 | 5.2760 | 50 | 370.1945 | 1.71387 |
| 100 | 379.8744 | 10.5522 | 100 | 740.3890 | 3.42773 |
| 1000 | 3798.7436 | | 1000 | 7403.8903 | |

3° *Mètres en toises, pieds, pouces et lignes.*

| NOMBRES de mètres. | MÈTRES en toises. | MÈTRES en toises, pieds, pouces, lignes. | | | | MÈTRES en pieds, pouces, lignes. | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | toises. | toises. | pi. | pouc. | lignes. | pieds. | pouc. | lignes. |
| 1 | 0.513074 | 0 | 3 | 0 | 11.296 | 3 | 0 | 11.296 |
| 2 | 1.026148 | 1 | 0 | 1 | 10.592 | 6 | 1 | 10.592 |
| 3 | 1.539222 | 1 | 3 | 2 | 9.888 | 9 | 2 | 9.888 |
| 4 | 2.052296 | 2 | 0 | 3 | 9.184 | 12 | 3 | 9.184 |
| 5 | 2.565370 | 2 | 3 | 4 | 8.480 | 15 | 4 | 8.480 |
| 6 | 3.078444 | 3 | 0 | 5 | 7.776 | 18 | 5 | 7.776 |
| 7 | 3.591518 | 3 | 3 | 6 | 7.072 | 21 | 6 | 7.072 |
| 8 | 4.104592 | 4 | 0 | 7 | 6.368 | 24 | 7 | 6.368 |
| 9 | 4.617666 | 4 | 3 | 8 | 5.664 | 27 | 8 | 5.664 |
| 10 | 5.130740 | 5 | 0 | 9 | 4.960 | 30 | 9 | 4.960 |

4° *Décimètres en pieds, pouces et lignes; centimètres en pouces et lignes, et millimètres en lignes.*

| NOMBRES d'unités. | DÉCIMÈTRES en pieds, pouces, lignes. | | | CENTIMÈTRES en pouces et lignes. | | MILLIMÈTRES en lignes. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | pieds. | pouces. | lignes. | pouces. | lignes. | lignes. |
| 1 | 0 | 3 | 8.330 | 0 | 4.433 | 0.443 |
| 2 | 0 | 7 | 4.659 | 0 | 8.866 | 0.887 |
| 3 | 0 | 11 | 0.989 | 1 | 1.299 | 1.330 |
| 4 | 1 | 2 | 9.318 | 1 | 5.732 | 1.773 |
| 5 | 1 | 6 | 5.648 | 1 | 10.165 | 2.216 |
| 6 | 1 | 10 | 1.977 | 2 | 2.598 | 2.660 |
| 7 | 2 | 1 | 10.307 | 2 | 7.031 | 3.103 |
| 8 | 2 | 5 | 6.637 | 2 | 11.464 | 3.546 |
| 9 | 2 | 9 | 2.966 | 3 | 3.897 | 3.990 |
| 10 | 3 | 0 | 11.296 | 3 | 8.330 | 4.433 |

5° *Mètres carrés et cubes en toises carrées et cubes.*

| NOMBRES d'unités. | MÈTRES CARRES en toises carrées. | MÈTRES CUBES en toises cubes. |
|---|---|---|
| | toises carrées. | toises cubes |
| 1 | 0.2632 | 0.1351 |
| 2 | 0.5265 | 0.2701 |
| 3 | 0.7897 | 0.4052 |
| 4 | 1.0530 | 0 5403 |
| 5 | 1.3162 | 0.6753 |
| 6 | 1.5795 | 0.8104 |
| 7 | 1.8427 | 0.9454 |
| 8 | 2.1060 | 1.0805 |
| 9 | 2.3692 | 1.2156 |
| 10 | 2.6324 | 1.3506 |

*Mètres carrés et cubes en pieds carrés et cubes.*

| NOMBRES d'unités. | MÈTRES CARRÉS en pieds carrés. | MÈTRES CUBES en pieds cubes. |
|---|---|---|
| | pieds carrés. | pieds cubes. |
| 1 | 9.48 | 29.17 |
| 2 | 18.95 | 58.35 |
| 3 | 28.43 | 87.52 |
| 4 | 37.91 | 116.70 |
| 5 | 47.38 | 145.87 |
| 6 | 56.86 | 175.04 |
| 7 | 66.34 | 204.22 |
| 8 | 75.81 | 233.39 |
| 9 | 85.29 | 262.56 |
| 10 | 94.77 | 291.74 |

6° *Dans la construction des tables qui précèdent, on a adopté les valeurs suivantes :*

| | |
|---|---|
| Toise. . . . . | 1,949 036 5912 mètre. |
| Toise carrée. . . . . | 3,798 743 6338 mètres carrés. |
| Toise cube. . . . . | 7,403 890 3430 mètres cubes. |
| Mètre. . . . . | 0,513 074 de toise. |
| Mètre carré. . . . . | 0,263 244 929 476 de toise carrée. |
| Mètre cube. . . . . | 0.135 064 128 946 de toise cube. |

7° *Mesures itinéraires.*

| | | |
|---|---|---|
| La lieue de 25 au degré. . . . . | vaut . . . . | 4,444 kilomètres. |
| La lieue marine, de 20 au degré. . | — . . . . | 5,556 — |
| La lieue de poste, de 2000 toises. . | — . . . . | 3,898 — |
| Le mille, de 1000 toises. . . . . | — . . . . | 1,949 — |
| 1 kilomètre vaut. . . . . | 0,22499 | lieue de 25 au degré. |
| — . . . . . | 0,17778 | — 20 au degré. |
| — . . . . . | 0,26651 | — 2000 toises. |
| — . . . . . | 0,53302 | mille. |

8° *Mesures agraires.*

| | PIEDS CARRÉS. | TOISES CARRÉES. | MÈTRES CARRÉS. |
|---|---|---|---|
| Perches des eaux et forêts. . . . | 484 | 13.44 | 51.07 |
| Arpent des eaux et forêts . . . . | 48400 | 1344.44 | 5107.20 |
| Perche de Paris. . . . . | 324 | 9 | 34.19 |
| Arpent de Paris. . . . . | 32400 | 900 | 3418.87 |
| Are. . . . . | 947.7 | 26.32 | 100 |
| Hectare. . . . . | 94768.2 | 2632.45 | 10000 |

9° *Arpents en hectares.*

| NOMBRES d'arpents. | ARPENTS de 100 perches de 22 pieds de côté. | ARPENTS de 100 perches de 18 pieds de côté. |
|---|---|---|
| | hectares. | hectares. |
| 1 | 0.5107 | 0.3419 |
| 2 | 1.0214 | 0.6838 |
| 3 | 1.5322 | 1.0257 |
| 4 | 2.0429 | 1.3675 |
| 5 | 2 5536 | 1.7094 |
| 6 | 3.0643 | 2.0513 |
| 7 | 3.5750 | 2.3932 |
| 8 | 4.0858 | 2.7351 |
| 9 | 4.5965 | 3.0770 |
| 10 | 5.1072 | 3.4189 |
| 100 | 51.0720 | 34.1887 |
| 1000 | 510.7198 | 341.8869 |

*Hectares en arpents.*

| NOMBRES d'hectares. | ARPENTS de 100 perches de 22 pieds. | ARPENTS de 100 perches de 18 pieds. |
|---|---|---|
| | arpents. | arpents. |
| 1 | 1.9580 | 2.9249 |
| 2 | 3.9160 | 5.8499 |
| 3 | 5.8741 | 8.7748 |
| 4 | 7.8321 | 11.6998 |
| 5 | 9.7901 | 14.6247 |
| 6 | 11.7481 | 17.5497 |
| 7 | 13.7061 | 20.4746 |
| 8 | 15 6642 | 23.3995 |
| 9 | 17.6222 | 26.3245 |
| 10 | 19.5802 | 29.2494 |
| 100 | 195.8020 | 292.4944 |
| 1000 | 1958.0201 | 2924.9437 |

10° *Réduction des setiers de 12 boisseaux de 131,01 en hectolitres.*

| SETIERS. | HECTOLITRES. |
|---|---|
| 1 | 1.56 |
| 2 | 3.12 |
| 3 | 4.68 |
| 4 | 6.24 |
| 5 | 7.80 |
| 6 | 9.36 |
| 7 | 10.92 |
| 8 | 12.48 |
| 9 | 14.04 |
| 10 | 15.60 |
| 50 | 78.00 |
| 100 | 156.00 |

*Réduction des hectolitres en setiers.*

| HECTOLITRES. | SETIERS. |
|---|---|
| 1 | 0.641 |
| 2 | 1.282 |
| 3 | 1.923 |
| 4 | 2.564 |
| 5 | 3.205 |
| 6 | 3.846 |
| 7 | 4.487 |
| 8 | 5.128 |
| 9 | 5.769 |
| 10 | 6.410 |
| 50 | 32.651 |
| 100 | 64.102 |

11° *Réduction des muids de grain, de sel, d'avoine et de charbon en hectolitres.*

| NOMBRES de muids. | GRAIN. — Muid de 144 boisseaux. | SEL. — Muid de 192 boisseaux. | AVOINE. — Muid de 288 boisseaux. | CHARBON. — Muid de 320 boisseaux. |
|---|---|---|---|---|
| | hect. | hect. | hect. | hect. |
| 1 | 18.73 | 24.98 | 37.46 | 41.60 |
| 2 | 37.46 | 49.95 | 74.93 | 83.30 |
| 3 | 56.20 | 74.93 | 112.39 | 124.90 |
| 4 | 74.93 | 99.90 | 149.86 | 166.50 |
| 5 | 93.66 | 124.88 | 187.32 | 208.10 |
| 6 | 112.39 | 149.86 | 224.78 | 249.80 |
| 7 | 131.12 | 174.83 | 262.25 | 291.40 |
| 8 | 149.86 | 199.81 | 299.71 | 333.00 |
| 9 | 168.59 | 224.78 | 337.18 | 374.60 |
| 10 | 187.30 | 249.80 | 374.60 | 416.00 |

12° *Réduction des pintes en litres.*

| PINTES. | LITRES. |
|---|---|
| 1 | 0.952 |
| 2 | 1.904 |
| 3 | 2.856 |
| 4 | 3.808 |
| 5 | 4.760 |
| 6 | 5.712 |
| 7 | 6.664 |

*Réduction des veltes en litres.*

| VELTES. | LITRES. |
|---|---|
| 1 | 7.62 |
| 2 | 15.23 |
| 3 | 22.85 |
| 4 | 30.46 |
| 5 | 38.08 |
| 6 | 45.70 |
| 7 | 53 31 |
| 8 | 60.93 |
| 9 | 68.54 |
| 10 | 76.16 |

*Réduction des litres en pintes.*

| LITRES. | PINTES. |
|---|---|
| 1 | 1.05042 |
| 2 | 2.10 |
| 3 | 3.15 |
| 4 | 4.20 |
| 5 | 5.25 |
| 6 | 6.30 |
| 7 | 7.35 |
| 8 | 8.40 |
| 9 | 9.49 |
| 10 | 10.50 |

13° *Conversion des anciens poids en nouveaux.*

| GRAINS. | GRAMMES. | ONCES. | GRAMMES. | LIVRES. | KILOGRAMMES. |
|---|---|---|---|---|---|
| 10 | 0.53 | 1 | 30 59 | 1 | 0.4895 |
| 20 | 1.06 | 2 | 61.19 | 2 | 0.9790 |
| 30 | 1.59 | 3 | 91.78 | 3 | 1.4685 |
| 40 | 2.12 | 4 | 122.38 | 4 | 1.9580 |
| 50 | 2.66 | 5 | 152.97 | 5 | 2.4475 |
| 60 | 3.19 | 6 | 183.56 | 6 | 2.9370 |
| 70 | 3.72 | 7 | 214.16 | 7 | 3.4265 |
| GROS. | | 8 | 244.75 | 8 | 3.9160 |
| 1 | 3.82 | 9 | 275.35 | 9 | 4.4056 |
| 2 | 7.65 | 10 | 305.94 | 10 | 4.8951 |
| 3 | 11.47 | 11 | 336.53 | 50 | 24 4753 |
| 4 | 15.30 | 12 | 367.14 | 100 | 48.9506 |
| 5 | 19.12 | 13 | 397.73 | 500 | 244 7529 |
| 6 | 22.94 | 14 | 428.33 | 1000 | 489.5058 |
| 7 | 26.77 | 15 | 458.91 | | |

14° *Conversion des nouveaux poids en anciens.*

| GRAMMES. | ONCES. | GROS. | GRAINS. | GRAMMES. | LIVRES. | ONCES. | GROS. | GRAINS. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.05 | 0 | 0 | 0.94136 | 300 | 0 | 9 | 6 | 32 |
| 0.10 | 0 | 0 | 1.88 | 400 | 0 | 13 | 0 | 43 |
| 0.15 | 0 | 0 | 2.82 | 500 | 1 | 0 | 2 | 53 |
| 0 20 | 0 | 0 | 3.77 | 600 | 1 | 3 | 4 | 64 |
| 0.25 | 0 | 0 | 4.71 | 700 | 1 | 6 | 7 | 3 |
| 0.50 | 0 | 0 | 9.41 | 800 | 1 | 10 | 1 | 13 |
| 0.75 | 0 | 0 | 14.12 | 900 | 1 | 13 | 3 | 24 |
| 1 | 0 | 0 | 18 83 | kil. 1 | 2 | 0 | 5 | 35.15 |
| 2 | 0 | 0 | 37.65 | 2 | 4 | 1 | 2 | 70 |
| 3 | 0 | 0 | 56 48 | 3 | 6 | 2 | 0 | 33 |
| 4 | 0 | 1 | 3.30 | 4 | 8 | 2 | 5 | 69 |
| 5 | 0 | 1 | 22.14 | 5 | 10 | 3 | 3 | 32 |
| 6 | 0 | 1 | 41 | 6 | 12 | 4 | 0 | 67 |
| 7 | 0 | 1 | 60 | 7 | 14 | 4 | 6 | 30 |
| 8 | 0 | 2 | 7 | 8 | 16 | 5 | 3 | 65 |
| 9 | 0 | 2 | 25 | 9 | 18 | 6 | 1 | 28 |
| 10 | 0 | 2 | 44 | 10 | 20 | 6 | 6 | 64 |
| 20 | 0 | 5 | 17 | 20 | 40 | 13 | 5 | 55 |
| 30 | 0 | 7 | 61 | 30 | 61 | 4 | 4 | 47 |
| 40 | 1 | 2 | 33 | 40 | 81 | 11 | 3 | 38 |
| 50 | 1 | 5 | 5 | 50 | 102 | 2 | 2 | 30 |
| 60 | 1 | 7 | 50 | 60 | 122 | 9 | 1 | 21 |
| 70 | 2 | 2 | 22 | 70 | 143 | 0 | 0 | 13 |
| 80 | 2 | 4 | 66 | 80 | 163 | 6 | 7 | 4 |
| 90 | 2 | 7 | 38 | 90 | 183 | 13 | 5 | 68 |
| 100 | 3 | 2 | 11 | 100 | 204 | 4 | 4 | 59 |
| 200 | 6 | 4 | 21 | | | | | |

Le kilogramme, ou le poids d'un décimètre cube d'eau distillée considérée au maximum de densité vaut. . . . . 18827.15 grains.
La livre vaut. . . . . 9216 grains.
Donc, la livre vaut. . . . . 0.489505847 kilog.
Et le kilogramme. . . . . 2.042876549 livres.

15° *Conversion des nouveaux poids en anciens.*

| KILOGRAM. | LIVRES. | GRAMMES. | GRAINS. | DÉCIGRAM. | GRAINS. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2.0429 | 1 | 18.827 | 1 | 1.9 |
| 2 | 4.0 58 | 2 | 37.6 | 2 | 3.8 |
| 3 | 6.1286 | 3 | 56.5 | 3 | 5.6 |
| 4 | 8.1715 | 4 | 75.3 | 4 | 7.5 |
| 5 | 10.2144 | 5 | 94.1 | 5 | 9.4 |
| 6 | 12.2573 | 6 | 113.0 | 6 | 11.3 |
| 7 | 14.3001 | 7 | 131.8 | 7 | 13.2 |
| 8 | 16.3430 | 8 | 150.6 | 8 | 15.1 |
| 9 | 18.3859 | 9 | 169.4 | 9 | 16.9 |
| 10 | 20.4288 | 10 | 188.27 | 10 | 18.8 |

**677.** TABLE DE COMPARAISON DES MESURES ANGLAISES AUX MESURES FRANÇAISES.

*Mesures de longueur.*

| Anglaises. | Françaises. |
|---|---|
| Pouce (1/36 du yard) | 2.539954 centimètres. |
| Pied (1/3 du yard) | 3.0479449 décimètres. |
| Yard impérial | 0.91438348 mètre. |
| Fathom (2 yards) | 1.82876696 mètre. |
| Pole ou perch (5 et 1/3 yards) | 5.02911 mètres. |
| Furlong (220 yards) | 201.16437 mètres. |
| Mille (1760 yards) | 1609.3449 mètres. |

| Françaises. | Anglaises. |
|---|---|
| Millimètre | 0.03937 pouce. |
| Centimètre | 0.393708 pouce. |
| Décimètre | 3.937079 pouces. |
| Mètre | 39.37079 pouces. |
| | 3.2808992 pieds. |
| | 1.093633 yards. |
| Myriamètre | 6.2138 milles. |

*Mesures de superficie.*

| Anglaises. | Françaises. |
|---|---|
| Yard carré | 0.836097 mètre carré. |
| Rod (perche carrée) | 25.291939 mètres carrés. |
| Rood (1210 yards carrés) | 10.116775 ares. |
| Acre (4840 yards carrés) | 0.404671 hectares. |

| Françaises. | Anglaises. |
|---|---|
| Mètre carré | 1.196033 yard carré. |
| Are | 0.098845 rood. |
| Hectare | 2.471143 acres. |

*Mesures de capacité.*

| Anglaises. | Françaises. | |
|---|---|---|
| Pint (1/8 de gallon) | 0,567 932 | litre. |
| Quart (1/4 de gallon) | 1.135 864 | litre. |
| Gallon impérial | 4.543 457 97 | litres. |
| Peck (2 gallons) | 9.086 9159 | litres. |
| Bushel (8 gallons) | 36.347 664 | litres. |
| Sack (3 bushels) | 1.090 43 | hectolitre. |
| Quarter (8 bushels) | 2.907 813 | hectolitres. |
| Chaldron (12 sacks) | 13.085 16 | hectolitres. |

| Françaises. | Anglaises. | |
|---|---|---|
| Litre | 1.760 773 | pint. |
| | 0.220 0967 | gallon. |
| Decalitre | 2.200 9668 | gallons. |
| Hectolitre | 22.009 668 | gallons. |

*Poids.*

| Anglais (Troy). | Français. | |
|---|---|---|
| Grain (1/24 de pennyweight) | 0.065 | gramme. |
| Pennyweight (1/20 d'once) | 1.555 | gramme. |
| Once (1/12 de livre troy) | 31.091 | grammes. |
| Livre troy impériale) | 0.373 096 | kilogramme. |

| Anglais (avoirdupois). | Français. | |
|---|---|---|
| Dramm (1/16 d'once) | 1.771 | gramme. |
| Once (1/16 de la livre) | 28.338 | grammes. |
| Livre avoirdupois impériale | 0.453 4 | kilogramme. |
| Quintal (112 livres) | 50.78 | kilogrammes. |
| Tonne (20 quintaux) | 1015.65 | kilogrammes. |

| Français. | Anglais. | |
|---|---|---|
| Gramme | 15.438 | grains troy. |
| | 0.643 | pennyweight. |
| | 0.032 2 | once troy. |
| Kilogramme | 2.680 3 | livres troy. |
| | 2.205 5 | livres avoirdupois. |

**678.** *Conversion des mesures anglaises en mesures françaises.*

| NOMB. d'unités. | POUCES en centimètres. | PIEDS en mètres. | MILLES en kilomètres. | PIEDS carrés en mètres carrés. | PIEDS CUBES en mètres cubes. | LIVRES par pouce carré en kilog. par centimètre carré. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2.5400 | 0.3047945 | 1.6093 | 0.09290 | 0.028314 | 0.0702774 |
| 2 | 5.0799 | 0.6095890 | 3.2186 | 0.18580 | 0.056628 | 0.1405548 |
| 3 | 7.6199 | 0.9143835 | 4.8279 | 0.27870 | 0.084942 | 0 2108322 |
| 4 | 10.1598 | 1.2197680 | 6.4373 | 0.37160 | 0.113256 | 0.2811096 |
| 5 | 12.6998 | 1.5239724 | 8.0466 | 0.46450 | 0.141570 | 0.3513870 |
| 6 | 15.2397 | 1.8287669 | 9.6559 | 0.55740 | 0.169884 | 0 4216644 |
| 7 | 17.7797 | 2.1335614 | 11.2652 | 0.65030 | 0.198198 | 0.4919418 |
| 8 | 20.3196 | 2.4383559 | 12.8745 | 0.74320 | 0.226512 | 0.5622192 |
| 9 | 22.8596 | 2.7431504 | 14.4838 | 0.83610 | 0.254826 | 0.6324966 |
| 10 | 25.4000 | 3.0479450 | 16.0930 | 0.92900 | 0.283140 | 0.7027740 |

| NOMBRES d'unités. | LIVRES en kilogrammes. | TONNES en tonneaux de 1000 kil. | LIVRES STERL. en francs. | SCHELLING en francs. | PENCES ou deniers en centimes. |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0.4534148 | 1 015649 | 25.2080 | 1.2604 | 10.5033 |
| 2 | 0.9068296 | 2.031298 | 50.4160 | 2.5208 | 21.0066 |
| 3 | 1.3602444 | 3.046947 | 75.6240 | 3.7812 | 31.5099 |
| 4 | 1.8136592 | 4.062596 | 100.8320 | 5.0416 | 42 0132 |
| 5 | 2 2670740 | 5.078245 | 126.0400 | 6.3020 | 52.5165 |
| 6 | 2.7204888 | 6.093894 | 151.2480 | 7.5624 | 63.0198 |
| 7 | 3.1739036 | 7.109543 | 176 4560 | 8.8228 | 73 5231 |
| 8 | 3.6273184 | 8.125192 | 201.6640 | 10.0832 | 84.0264 |
| 9 | 4.0807332 | 9.140841 | 226.8720 | 11.3436 | 94.5297 |
| 10 | 4.5341480 | 10.156490 | 252.0800 | 12.6040 | 105.0330 |

Le *mille* vaut 5280 pieds anglais; il en faut 2 et 1/2 pour faire une lieue.

La *livre sterling* vaut à peu près 25 francs.

Le *schelling* (1/20 de la livre sterling) vaut environ 1 fr. 25 c.

Le *penny* ou denier, monnaie de cuivre (1/12 de schelling), diffère très-peu du décime.

Le schelling et le penny ont une valeur intrinsèque un peu moindre que leur valeur nominale portée au tableau. Voici du reste le tableau des monnaies anglaises, de leur titre, et de leur valeur courante dans le commerce.

| MONNAIES. | TITRE. | VALEUR en schelling et penny. | FRANCS. |
|---|---|---|---|
| *Or.* | | | |
| Guinée. . . . . | 0.917 | 21 sch. 0 pen. | 26f.25 |
| Demi-guinée. . . . . | 0.917 | 10 6 | 13.125 |
| Souverain. . . . . | 0.916 | 20 0 | 25.00 |
| Demi-souverain. . . . . | 0.916 | 10 0 | 12.50 |
| *Argent.* | | | |
| Couronne. . . . . | 0.923 | 5 0 | 6.25 |
| Demi-couronne. . . . . | 0.923 | 2 6 | 3.125 |
| Schelling. . . . . | 0.923 | 0 12 | 1.25 |
| Demi-schelling. . . . . | 0.923 | 0 6 | 0.625 |
| *Cuivre.* | | | |
| Penny ou denier. . . . . | » | 0 1 | 0.1042 |
| Demi-penny. . . . . | » | 0 0.5 | 0.0521 |

## 679. *Mesures russes.*

1° De longueur : la *sagène* vaut 7 *pieds* ou $2^{m},1336$, le pied, 12 *pouces* ou $0^{m},3048$; le pouce, 10 *lignes* ou $0^{m},0254$, et la ligne $0^{m},00254$.

Dans les constructions, on emploie l'*archine*, qui est le tiers de la sagène, et qui vaut 16 *verchkoffs* ou $0^{m},7115$, le verchkoff vaut $0^{m},0444$.

La mesure itinéraire est la *verste*, qui vaut 1067 mètres.

2° De capacité pour les liquides : le *tonneau* vaut 40 *vedros* ou $471^{l},56$; le vedro, 10 *kruskas* ou 8 *chtoffs* ou $12^{l},289$; le kruska, 10 *tcharkis* ou $1^{l},229$.

Pour les matières sèches, on emploie le *tchetvert*, qui vaut 8 *tchetvericks* ou $209^{l},740$; le tchetverick vaut 8 *garnetz*, et le garnetz, $3^{l},277$.

3° De poids : le *berkobetz* vaut 10 *pouds* ou $163^{k},72$; le poud, 40 *livres* ou $16^{k},372$; la livre, 96 *zolotnicks* ou $0^{k},409388$; le *zolotnick*, 96 *doleis*, et le doleis $0^{k},00005$.

*4° Tableau des monnaies russes.*

| MONNAIES. | TITRE. | VALEUR. | |
|---|---|---|---|
| | | rouble. | fr. |
| *Or.* | | | |
| Ducat à l'aigle éployée | 0.979 | 2.95 | 11.78 |
| Ducat de 1763 | 0.969 | 2.90 | 11.59 |
| Pièces de Paul Ier et Alexandre Ier (dites de 10 roubles) | 0.969 | 13.10 | 52.38 |
| Pièces de 5 roubles (de 1849) | 0.916 | 5.16 | 20.66 |
| *Argent.* | | | |
| Rouble | 0.868 | 4 solotniks. | 4.00 |
| Solotnik | 0.868 | 5 copecks. | 1.00 |
| Copeck | 0.868 | » | 0.20 |

**630.** *Évaluations, en mesures françaises, des principales mesures linéaires étrangères, à l'usage du commerce.*

| | | millim. |
|---|---|---|
| Amsterdam | *aune* | 690.3 |
| Anvers | *aune de soie* | 694.3 |
| | *aune de laine* | 684.4 |
| Berlin | *aune* (ancienne mesure) | 667.7 |
| | *aune* (nouvelle mesure) | 666.9 |
| Berne | *aune* | 542.5 |
| Bologne | *brasse* | 645.2 |
| Brunswick | *aune* | 570.7 |
| Brême | *aune* | 578.4 |
| Cagliari | *raso* | 549.3 |
| Carrare | *canne pour les bois* | 624.6 |
| | *brasse marchande* | 619.7 |
| | *palme pour les marbres* | 249.3 |
| Cassel | *aune* | 569.4 |
| Cologne | *aune* | 575.2 |
| Constantinople | *grande mesure* | 669.1 |
| | *petite mesure* | 647.9 |
| Copenhague | *aune danoise* | 627.7 |
| Cracovie | *aune* | 617.0 |
| Crémone | *brasse* (d'après les tavole di Ragguaglio) | 594.9 |
| Dresde | *aune* | 566.5 |
| Ferrare | *brasse pour la soie* (tables italiennes) | 634.4 |
| | *brasse pour le coton et le linge* (tables ital.) | 673.6 |
| Florence | *brasse* | 594.2 |
| Francfort-sur-Mein | *aune* | 547.8 |

| | | millim. |
|---|---|---|
| Gênes | *palme* (commission génoise) | 248.3 |
| Genève | *aune* | 1143.7 |
| Hambourg | *aune de Hambourg* | 573.0 |
| | *aune de Brabant* | 691.4 |
| Hanovre | *aune* | 584.0 |
| Harlem | *aune ordinaire* | 683.5 |
| | *aune pour le linge* | 742.6 |
| Leyde | *aune* | 683.1 |
| Leipsick | *aune* | 565.3 |
| Lisbonne | *vare* | 1092.9 |
| Lubeck | *aune* | 577.0 |
| Lucques | *brasse* | 595.1 |
| Madrid | *vare* (aune de Castille) | 848.0 |
| Mantoue | *brasse* | 643.8 |
| Milan | *brasse* | 594.9 |
| Modène | *brasse* | 648.1 |
| Munich | *aune* | 833.0 |
| Naples | *canne* (8 palmes napolitaines) | 2096.1 |
| Neufchâtel | *aune* | 1111.1 |
| Nurenberg | *aune* | 656.4 |
| Ostende | *aune* | 699.3 |
| Padoue | *brasse pour le drap* | 681.0 |
| | *brasse pour la soie* | 637.5 |
| Palerme | *canne* divisée en 8 palmes | 1942.3 |
| Parme | *brasse pour la laine, le coton et le linge* | 643.8 |
| | *brasse pour la soie* | 594.4 |
| Pavie | *brasse* | 594.9 |
| Pétersbourg | *archine* | 711.5 |
| Raguse | *aune* | 513.2 |
| Riga | *aune* | 548.2 |
| Rome | *canne des marchands* divisée en 8 palmes | 1992.0 |
| | *brasse des marchands* divisée en 4 palmes | 848.2 |
| | *brasse des tisserands* divisée en 3 palmes | 636.1 |
| Rostock | *aune* | 575.2 |
| Stockholm | *aune de Suède* | 593.7 |
| Stuttgard | *aune de Wurtemberg* | 614.3 |
| Turin | *raso* divisé en 14 onces (vassali eandi) | 599.4 |
| Varsovie | *aune* | 584.6 |
| Vérone | *grande brasse* | 649.0 |
| | *petite brasse* | 642.4 |
| Weimar | *aune* | 564.0 |
| Venise | *brasse de laine* | 683.4 |
| | *brasse de soie* | 638.7 |
| Vicence | *brasse de drap* | 690.3 |
| | *brasse de soie* | 637.5 |

| | | millim. |
|---|---|---|
| Vienne | *aune de Vienne* | 779.2 |
| | *aune de la haute Autriche* | 799.7 |
| Zurich | *aune* | 600.1 |

**681.** *Réduction des principales mesures linéaires étrangères en mesures métriques.*

| | | millim. |
|---|---|---|
| Amsterdam | *pied* | 283,056 |
| Anvers | *pied* | 285.588 |
| Berlin | *pied du Rhin* (rendu légal dans toute la Prusse) | 313.854 |
| Berne | *pied* | 293.258 |
| Brunswick | *pied* | 285.362 |
| Brême | *pied* | 289.197 |
| Cagliari | *palme, mesure du pays* | 248.367 |
| | *palme, mesure de la ville* | 202.573 |
| Calemberg | *pied* | 293.032 |
| Carlsruhe | *pied nouveau* | 300.000 |
| Cassel | *pied de construction* | 284.911 |
| Chine | *pied* | 306.288 |
| Cologne sur le Rhin (Prusse) | *pied* | 313.854 |
| Constantinople | *grand pick* | 669.079 |
| | *petit pick* ou *draa stambulin* | 647,874 |
| Copenhague | *pied* | 313.621 |
| Cracovie | *pied* | 356.421 |
| Darmstadt | *pied de construction* | 300.000 |
| Dresde | *pied* | 283.260 |
| Durlach | *pied* | 291.002 |
| Egypte | *coudée antique* | 525.924 |
| Espagne | *pied de Madrid*, d'après Lohman | 282,655 |
| | *vare de Castille*, d'après Ciscar | 835.906 |
| | *vare de la Havanne*, 3 pieds de Madrid | 847.965 |
| Gotha | *pied* | 287.618 |
| Hambourg | *pied* | 286.490 |
| Hanovre | *pied* | 291.995 |
| Lisbonne | *palme* | 218.590 |
| | *pied de construction* | 338.600 |
| Lubeck | *pied* | 291.002 |
| Middelbourg | *pied* | 300.025 |
| Munich | *pied* | 291.859 |
| Neufchâtel | *pied* | 300.025 |
| Nurenberg | *pied* | 303.793 |
| Oldembourg | *pied* | 296.416 |
| Pétersbourg | *pied russe* | 538,151 |
| | *archine* | 711.480 |

| | | millim. |
|---|---|---|
| Rostock | *pied* | 291.002 |
| Stockholm | *pied* | 296.838 |
| Stuttgard | *pied* | 286.490 |
| Varsovie | *pied* | 297.769 |
| Weimar | *pied* | 281.972 |
| Vienne | *pied* | 316.103 |
| Wisbaden | *pied* | 287.844 |
| Zante et Céphalonie | *pied* | 347.398 |
| Zurich | *pied* | 301.379 |

**682.** *TABLEAU des équivalents chimiques des différents corps, celui de l'oxygène étant représenté par 100.*

| SUBSTANCES. | FORMULES. | ÉQUIVALENTS. |
|---|---|---|
| **Acide acétique** (dens. 1063). | $C^4H^4O^4 = C^4H^3O^3 + HO$ | 750.00 |
| Acétates | $C^4H^3O^3 + RO$ | |
| Acétates hydratés | $C^4H^3O^3 + RO + nHO$ | |
| **Alcool** | $C^4H^6O^2$ | 575.00 |
| **Aluminium** | Al | 171.16 |
| Alumine | $Al^2O^3$ | 642 32 |
| Chlorure d'aluminium | $Al^2Cl^3$ | 1670.28 |
| Alun potassique | $3SO^3, Al^2O^3 + SO^3, KO + 24HO$ | 5962.34 |
| — ammonique | $3SO^3, Al^2O^3 + SO^3, AzH^3, HO + 24HO$ | 5673.44 |
| **Ammoniaque** | $AzH^3$ | 212.50 |
| Sulfate d'ammoniaque | $SO^3, AzH^3, HO$ | 826.16 |
| Azotate — | $AzO^5, AzH^3, HO$ | 1000.00 |
| Oxalate — | $C^2O^3, AzH^3, HO + HO$ | 887.50 |
| **Antimoine** | Sb | 1612.90 |
| Oxyde d'antimoine | $SbO^3$ | 1912.90 |
| Acide antimonieux | $SbO^4$ | 2112.90 |
| Acide antimonique | $SbO^5$ | 2112.90 |
| Protochlorure, sulfure, iodure | $SbCl^3, S^3, I^3$ | |
| Perchlorure, sulfure | $SbCl^5, S^5$ | |
| **Argent** | Ag | 1351.61 |
| Oxyde d'argent | AgO | 1451.61 |
| Chlorure, sulfure, iodure et cyanure d'argent | AgCl, S, I, Cy | |
| Azotate d'argent | $AzO^5AgO$ | 2126.61 |
| Sulfate — | $SO^3, AgO$ | 1952.77 |
| **Arsenic** | As | 940.08 |
| Acide arsénieux | $AsO^3$ | 1240.08 |
| Acide arsénique | $AsO^5$ | 1440.08 |
| Protochlorure, sulfure d'arsenic | $AsCl^3, S^3$ | |
| Perchlorure | $AsCl^5$ | |
| Arsénites | $AsO^3, RO$ | |
| Arséniates | $AsO^5, RO$ | |
| **Azote** | Az | 175.00 |
| Protoxyde d'azote | AzO | 275.00 |
| Bioxyde d'azote | $AzO^2$ | 375.00 |
| Acide azoteux | $AzO^3$ | 475.00 |
| — hypoazotique | $AzO^4$ | 575.00 |
| — azotique dans les sels | $AzO^5$ | 675.00 |
| — azotique hydraté | $AzO^5 + HO$ | 787.50 |

| SUBSTANCES. | FORMULES. | ÉQUIVALENTS. |
|---|---|---|
| Azotites | $AzO^3RO$ | |
| Azotates | $AzO^5, RO$ | |
| **Barium** | Ba | 856.88 |
| Baryte | BaO | 956.88 |
| Bioxyde de barium | $BaO^2$ | 1056.88 |
| Chlorure, sulfure | BaCl, S | |
| Sulfate de baryte | $SO^3, BaO$ | 1458.04 |
| Azotate — | $AzO^5, BaO$ | 1631.88 |
| Carbonate — | $CO^2, BaO$ | 1233.40 |
| Chlorate — | $ClO^5, BaO + HO$ | 2012.09 |
| **Benzoïle** | $C^{14}H^{10}O^2 = Bz$ | 1375 00 |
| Hydrure de benzoïle | BzH | 1387.50 |
| Chlorure | BzCl | 1817.65 |
| Acide benzoïque | Bz, HO | 1587.50 |
| Benzamide | $Bz, AzH^2$ | 1575.00 |
| **Bismuth** | Bi | 1330.37 |
| Oxyde de bismuth | $Bi^2O^3$ | 2960.75 |
| Chlorure, sulfure, iodure de bismuth | $Bi^2Cl^3, S^3, I^3$ | |
| Azotate de bismuth cristallisé | $3AzO^5, Bi^2O^3 + 9HO$ | |
| **Bore** | B | 136.20 |
| Acide borique fondu | $BO^3$ | 436.20 |
| — cristallisé | $BO^3 + 3HO$ | 773.70 |
| Gaz fluoborique | $BF^3$ | 837.60 |
| Borates | $BO^3, RO$ | |
| **Brome** | Br | 979 02 |
| Acide bromique | $BrO^5$ | 1479.02 |
| — bromhydrique | BrH | 991.52 |
| Bromures (Br. remplace O des oxydes) | | |
| **Cadmium** | Cd | 696.77 |
| Oxyde de cadmium | CdO | 796.77 |
| Chlorure, sulfure, iodure de cadmium | CdCl, S, I | |
| Sulfate de cadmium | $SO^3, CdO + 4HO$ | 1747.93 |
| **Calcium** | Ca | 256.02 |
| Chaux | CaO | 356.02 |
| Chaux hydratée | CaO, HO | 468.52 |
| Chlorure de calcium | CaCl | 798 67 |
| **Carbone** | C | 75.00 |
| Oxyde de carbone | CO | 175.00 |
| Acide carbonique | $CO^2$ | 275.00 |
| Acide oxalique anhydre | $C^2O^3$ | 450.00 |
| — desséché | $C^2O^3, HO$ | 562.50 |
| — cristallisé | $C^2O^3, 2HO$ | 675.00 |
| Carbonates | $CO^2, RO + nHO$ | |
| Oxalates | $C^2O^3, RO + nHO$ | |
| Acide mellitique | $C^4O^3$ | 600.00 |
| — croconique | $C^5O^4$ | 775.00 |
| Sulfure de carbone | $CS^2$ | 477.32 |
| Chlorure de carbone | $C^2Cl$ | 592.65 |
| Bichlorure de carbone | $C^2Cl^2$ | 1035.30 |
| Iodure de carbone | $C^2I$ | 1729.50 |
| Protocarbure d'hydrogène | $C^2H^4$ | 200.00 |
| Méthylène | $C^2H^2$ | 175.00 |
| Bicarbure d'hydrogène | $C^4H^4$ | 350.00 |
| — — de l'huile | $C^8H^8$ | 700.00 |

| SUBSTANCES. | FORMULES. | ÉQUIVALENTS. |
|---|---|---|
| Cétène | $C^{32}H^{32}$ | 2800.00 |
| Naphtaline | $C^{20}H^{8}$ | 1600.00 |
| Térébène | $C^{20}H^{16}$ | 1700.00 |
| **Cérium** | Ce | 574.69 |
| Oxyde de cérium | CeO | 674.69 |
| Sesquioxyde — | $Ce^{2}O^{3}$ | 1449.39 |
| **Chlore** | Cl | 442.65 |
| Acide hypochloreux | ClO | 542.65 |
| — chloreux | $ClO^{3}$ | 742.65 |
| — chlorique | $ClO^{5}$ | 942.65 |
| — hyperchlorique | $ClO^{7}$ | 1142.65 |
| — chlorhydrique | ClH | 455.15 |
| **Chrome** | Cr | 328.00 |
| Oxyde de chrome (Péligot) | CrO | 428.00 |
| Sesquioxyde de chrome | $Cr^{2}O^{3}$ | 956 00 |
| Acide chromique | $CrO^{3}$ | 628.00 |
| Chlorure de chrome (Péligot) | CrCl | 770.00 |
| Sesquichlorure | $Cr^{2}Cl^{3}$ | 1982.00 |
| Chromates | $CrO^{3}$, RO | |
| **Cobalt** | Co | 368.99 |
| Oxyde de cobalt | CoO | 468.99 |
| Sesquioxyde de cobalt | $Co^{2}O^{3}$ | 1037.98 |
| Sulfate de cobalt | $SO^{3}$, CoO + 6HO | 1645.03 |
| **Colombium** (Tantale) | Ta | 1153.74 |
| Oxyde de colombium | TaO | 1253.74 |
| Sesquioxyde de colombium | $Ta^{2}O^{3}$ | 2607.43 |
| **Cuivre** | Cu | 395.69 |
| Oxyde rouge de cuivre | $Cu^{2}O$ | 891.39 |
| Oxyde noir — | CuO | 495.69 |
| Sulfate de cuivre cristallisé | $SO^{3}$, CuO + 5HO | 1559 35 |
| Chlorure de cuivre | $Cu^{2}Cl$ | 1234.03 |
| Bichlorure — | CuCl | 838.34 |
| **Cyanogène** | $AzC^{2}$=Cy | 325.00 |
| Acide cyanhydrique | $AzC^{2}H$=CyH | 337.50 |
| Sulfocyanogène | $AzC^{2}S^{2}$ | 727.38 |
| Cyanoferrure d'hydrogène | CyFe, 2CyH + HO | 1451.70 |
| — jaune de potassium | CyFe, 2CyK + 3HO | 2631.53 |
| — rouge de potassium | $Cy^{3}Fe$, 3CyK | 4098.14 |
| **Esprit de bois** | $C^{2}H^{4}O^{2}$ | 400.00 |
| **Etain** | Sn | 735.29 |
| Oxyde d'étain | SnO | 835.29 |
| Acide stannique | $SnO^{2}$ | 935.29 |
| Chlorure d'étain | SnCl | 1177.94 |
| Bichlorure d'étain | $SnCl^{2}$ | 1620.59 |
| **Éther hydrique** | $C^{4}H^{5}O$ | 462.50 |
| — chlorhydrique | $C^{4}H^{5}Cl$ | 805.15 |
| — nitreux | $AzO^{3}$, $C^{4}H^{5}O$ | 939.50 |
| — acétique | $C^{8}H^{8}O^{4}$ | 1100.00 |
| — oxalique | $C^{6}H^{5}O^{4}$ | 942.15 |
| — benzoïque | $C^{18}H^{10}O^{4}$ | 1875.00 |
| — méthylique | $C^{2}H^{3}O$ | 287.50 |
| **Fer** | Fe | 339.20 |
| Protoxyde de fer | FeO | 439.20 |
| Sesquioxyde de fer | $Fe^{2}O^{3}$ | 978.41 |
| Protochlorure de fer | FeCl | 781.85 |
| Sesquichlorure de fer | $Fe^{2}Cl^{3}$ | 1003.18 |
| Sulfate de protoxyde de fer | $SO^{3}$, FeO + 7HO | 1727.86 |

| SUBSTANCES. | FORMULES. | ÉQUIVALENTS. |
|---|---|---|
| **Fluor** | Fl | 233.80 |
| Acide fluorhydrique | FlH | 246.30 |
| **Glucinium** | G | 331.26 |
| Glucine | GO | 441.26 |
| **Hydrogène** | H | 12.50 |
| Eau | HO | 112.50 |
| Eau oxygénée | $HO^2$ | 212.50 |
| **Iode** | I | 1579.50 |
| Acide iodique | $IO^5$ | 2079.00 |
| Acide iodhydrique | HI | 1592.00 |
| **Iridium** | Ir | 1233.50 |
| Oxyde d'iridium | IrO | 1333.50 |
| Sesquioxyde — | $Ir^2O^3$ | 2767.00 |
| Bioxyde — | $IrO^2$ | 1433.50 |
| Trioxyde — | $IrO^3$ | 1533.50 |
| **Lithium** | L | 80.37 |
| Lithine | LO | 180.37 |
| **Magnésium** | Ma | 158.35 |
| Magnésie | MaO | 258.35 |
| Chlorure de magnésium | MaCl | 601.00 |
| Sulfate de magnésie cristallisé | $SO^3$, MaO + 7HO | 1547.02 |
| **Manganèse** | Mn | 345.88 |
| Oxyde de manganèse | MnO | 445.88 |
| Oxyde rouge de manganèse | $Mn^3O^4$ | 1437.66 |
| Sesquioxyde de manganèse | $Mn^2O^3$ | 991.77 |
| Acide manganique | $MnO^3$ | 645.88 |
| Acide hypermanganique | $Mn^2O^7$ | 1391.77 |
| **Mercure** | Hg | 1265 82 |
| Protoxyde de mercure | $Hg^2O$ | 2631.64 |
| Bioxyde — | HgO | 1365.82 |
| Protochlorure — | $Hg^2Cl$ | 2974.29 |
| Protoiodure — | $Hg^2I$ | 4111.44 |
| Bichlorure — | HgCl | 1708.47 |
| Biiodure — | HgI | 2845.32 |
| Cyanure — | HgCy | 1590.82 |
| **Molybdène** | Mo | 598.52 |
| Oxyde de molybdène | MoO | 698.52 |
| Bioxyde de molybdène | $MoO^2$ | 798.52 |
| Acide molybdique | $MoO^3$ | 898.52 |
| **Nickel** | Ni | 369.67 |
| Oxyde de nickel | NiO | 469.67 |
| Sesquioxyde de nickel | $Ni^2O^3$ | 1039.35 |
| **Or** | Au | 1243.01 |
| Oxyde d'or | $Au^2O$ | 2586 02 |
| Acide aurique | $Au^2O^3$ | 2786.02 |
| Protochlorure d'or | $Au^2Cl$ | 2928.49 |
| Trichlorure d'or | $Au^2Cl^3$ | 3813.97 |
| **Osmium** | Os | 1244.48 |
| Oxyde d'osmium | OsO | 1344 48 |
| Sesquioxyde d'osmium | $Os^2O^3$ | 2788.97 |
| Bioxyde — | $OsO^2$ | 1444.48 |
| Trioxyde — | $OsO^3$ | 1544.48 |
| **Palladium** | Pa | 665.90 |
| Oxyde de palladium | PaO | 765.90 |
| Bioxyde — | $PaO^2$ | 865.90 |
| **Phosphore** | P | 392.31 |
| Oxyde de phosphore | $P^2O$ | 884.62 |

| SUBSTANCES. | FORMULES. | ÉQUIVALENTS. |
|---|---|---|
| Acide hypophosphoreux | PO | 492.31 |
| — phosphoreux | $PO^3$ | 692.31 |
| — phosphorique | $PO^5$ | 892.31 |
| Hydrure de phosphore solide | PH | 404.81 |
| **Platine** | Pt | 1233.50 |
| Oxyde de platine | PtO | 1333 50 |
| Bioxyde de platine | $PtO^2$ | 1433.50 |
| Bichlorure de platine | $PtCl^2$ | 2118.80 |
| Chlorure double de platine et de potassium | $PtCl^2KCl$ | 3051.36 |
| **Plomb** | Pb | 1294.50 |
| Sous-oxyde de plomb | $Pb^2O$ | 2689.00 |
| Oxyde — | PbO | 1394.50 |
| Oxyde puce — | $PbO^2$ | 1494.50 |
| Minium | $Pb^3O^4 = PbO^2, 2PbO$ | 4283.50 |
| Chlorure de plomb | PbCl | 1737.15 |
| Carbonate de plomb | $CO^2, PbO$ | 1669.50 |
| Oxalate de plomb | $C^2O^3, PbO$ | 1844.50 |
| **Potassium** | K | 489.92 |
| Potasse | KO | 589.92 |
| Potasse hydratée | KO + HO | 702.42 |
| Péroxyde de potassium | $KO^3$ | 789.92 |
| Chlorure — | KCl | 932.56 |
| Azoture — | $AzK^3$ | 1644.75 |
| Azotate de potasse | $AzO^5, KO$ | 1264.92 |
| **Rhodium** | Rd | 651.39 |
| Oxyde de rhodium | RdO | 751.39 |
| Sesquioxyde de rhodium | $Rd^2O^3$ | 1602.70 |
| Chlorure de rhodium | RdCl | 1094.04 |
| Sesquichlorure de rhodium | $Rd^2Cl^3$ | 2630.73 |
| **Sélénium** | Se | 494.60 |
| **Silicium** | Si | 277.31 |
| Acide silicique, quartz | $SiO^3$ | 577.31 |
| Chlorure de silicium | $SiCl^3$ | 1605.26 |
| Fluorure de silicium | $SiFl^3$ | 378.71 |
| **Sodium** | Na | 290.89 |
| Soude | NaO | 390.89 |
| Chlorure de sodium | NaCl | 733.54 |
| Sulfate de soudre hydraté | $SO^3, NaO + 10HO$ | 1017.05 |
| **Soufre** | S | 201.16 |
| Acide hypo-sulfureux | SO | 301.16 |
| — sulfureux | $SO^2$ | 401.16 |
| — hypo-sulfurique | $S^2O^5$ | 902.32 |
| — sulfurique anhydre | $SO^3$ | 501.16 |
| — sulfurique cristallisable | $SO^3, 2HO$ | 726.16 |
| **Strontium** | Sr | 587.28 |
| Strontiane | SrO | 687.28 |
| Sulfate de strontium | SrS | 788.44 |
| **Tellure** | Te | 801.76 |
| Acide tellureux | $TeO^2$ | 1001.76 |
| — tellurique | $TeO^3$ | 1101.76 |
| **Thorinium** | Th | 744.90 |
| Oxyde de thorinium | ThO | 844.90 |
| **Titane** | Ti | 303.66 |
| Acide titanique | $TiO^2$ | 503.66 |
| Chlorure de titane | $TiCl^2$ | 1188.90 |
| **Tungstène** ou **Wolfram** | W | 1183.00 |

| SUBSTANCES. | FORMULES. | ÉQUIVALENTS. |
|---|---|---|
| Oxyde de tungstène | $WO^2$ | 1383.00 |
| Acide tungstique | $WO^3$ | 1483.00 |
| **Uranium** | U | 750.00 |
| Urane (protoxyde), Péligot | UO | 850.00 |
| Péroxyde d'uranium | $U^2O^3$ | 1800.00 |
| **Vanadium** | V | 856.89 |
| Oxyde de vanadium | VO | 956.89 |
| Acide vanadeux | $VO^2$ | 1056.89 |
| — vanadique | $VO^3$ | 1156.89 |
| **Yttrium** | Y | 948.61 |
| Yttria | YO | 1048.61 |
| **Zinc** | Zn | 403.23 |
| Oxyde de Zinc | ZnO | 503.23 |
| Chlorure de zinc | ZnCl | 845.88 |
| Sulfate de zinc anhydre | $SO^3$, ZnO | 1004.39 |
| — — hydraté | $SO^3$, ZnO + 7HO | 1792.44 |
| **Zirconium** | Zr | 420.12 |
| Zircone | $Zr^2O^3$ | 1140.25 |

L'équivalent du soufre étant 201.16, et celui de l'oxygène 100, celui de l'acide sulfurique anhydre $SO^3$ est $201.16 + 100 \times 3 = 501.16$.

L'équivalent du fer étant 339.20, celui du protoxyde de fer FeO est 439.20.

L'équivalent de l'hydrogène étant 12.50, celui de l'eau HO est 112.50.

Enfin l'équivalent du sulfate de protoxyde de fer $SO^3$, FeO + 7HO est

$$501.16 + 439.20 + 112.50 \times 7 = 501.16 + 439.20 + 787.50 = 1727.86.$$

Pour avoir les quantités respectives d'acide sulfurique, de fer et d'eau qui entrent dans un poids donné de sulfate de protoxyde de fer, il suffit de diviser ce poids en quantités proportionnelles aux nombres 501.16, 439.20 et 787.50 (*Int.*, 364).

683. *Table des circonférences et des surfaces des cercles ayant pour diamètres les nombres de la première colonne, et des carrés, cubes, racines carrées et racines cubiques de ces nombres.*

| Nombres. | Circonférence. | Surface. | Carré. | Cube. | Racine carrée. | Racine cubique. | Nombres. | Circonférence. | Surface. | Carré. | Cube. | Racine carrée. | Racine cubique. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3.14 | 0.78 | 1 | 1 | 1.000 | 1.000 | 61 | 191.65 | 2922.46 | 3721 | 226981 | 7.810 | 3.936 |
| 2 | 6.28 | 3.14 | 4 | 8 | 1.414 | 1.259 | 62 | 194.77 | 3019.07 | 3844 | 238328 | 7.874 | 3.957 |
| 3 | 9.42 | 7.07 | 9 | 27 | 1.732 | 1.442 | 63 | 197.92 | 3117.24 | 3969 | 250047 | 7.937 | 3 979 |
| 4 | 12.57 | 12.57 | 16 | 64 | 2.000 | 1.587 | 64 | 201.06 | 3216.99 | 4096 | 262144 | 8.000 | 4.000 |
| 5 | 15.71 | 19.63 | 25 | 125 | 2.236 | 1.709 | 65 | 204.20 | 3318.30 | 4225 | 274625 | 8.062 | 4.020 |
| 6 | 18.85 | 28.27 | 36 | 216 | 2.449 | 1.817 | 66 | 207.34 | 3421.18 | 4356 | 287496 | 8.124 | 4.041 |
| 7 | 21.99 | 38.48 | 49 | 343 | 2.645 | 1.912 | 67 | 210.48 | 3525.65 | 4489 | 300765 | 8.185 | 4.061 |
| 8 | 25.13 | 50 26 | 64 | 512 | 2.828 | 2.000 | 68 | 213.62 | 3631.68 | 4624 | 314432 | 8.246 | 4.081 |
| 9 | 28.27 | 63.61 | 81 | 729 | 3.000 | 2.080 | 69 | 216.77 | 3739.28 | 4761 | 328509 | 8.306 | 4.101 |
| 10 | 31.41 | 78.54 | 100 | 1000 | 3.162 | 2.154 | 70 | 219.91 | 3848.45 | 4900 | 343000 | 8 366 | 4.121 |
| 11 | 34.55 | 95.03 | 121 | 1331 | 3.316 | 2.223 | 71 | 223.03 | 3959.19 | 5041 | 357911 | 8.426 | 4.140 |
| 12 | 37.69 | 113.09 | 144 | 1728 | 3.464 | 2.289 | 72 | 226.19 | 4071.50 | 5184 | 373248 | 8.485 | 4.160 |
| 13 | 40.84 | 132.73 | 169 | 2197 | 3.605 | 2.351 | 73 | 229.35 | 4185.38 | 5329 | 389017 | 8.544 | 4.179 |
| 14 | 43.98 | 153.93 | 196 | 2744 | 3.741 | 2.410 | 74 | 232.47 | 4300.84 | 5476 | 405224 | 8.602 | 4.198 |
| 15 | 47.12 | 176.71 | 225 | 3375 | 3.872 | 2.466 | 75 | 235.61 | 4417.86 | 5625 | 421875 | 8.660 | 4.217 |
| 16 | 50.26 | 201.06 | 256 | 4096 | 4.000 | 2.519 | 76 | 238.76 | 4536.45 | 5776 | 438976 | 8.717 | 4.235 |
| 17 | 53.40 | 226.98 | 289 | 4913 | 4.123 | 2.571 | 77 | 241.90 | 4655.62 | 5929 | 456533 | 8.774 | 4.254 |
| 18 | 56.54 | 254.46 | 324 | 5832 | 4.242 | 2.620 | 78 | 245.04 | 4778.36 | 6084 | 474552 | 8.831 | 4.272 |
| 19 | 59.69 | 283.52 | 361 | 6859 | 4.358 | 2.668 | 79 | 248 18 | 4901.66 | 6241 | 493039 | 8.888 | 4.290 |
| 20 | 62.83 | 314.15 | 400 | 8000 | 4.472 | 2.714 | 80 | 251.32 | 5026.54 | 6400 | 512000 | 8 944 | 4.308 |
| 21 | 65.97 | 346.36 | 441 | 9261 | 4.582 | 2.758 | 81 | 254.46 | 5153.00 | 6561 | 531441 | 9.000 | 4.326 |
| 22 | 69.11 | 380.13 | 484 | 10648 | 4.690 | 2.802 | 82 | 257.61 | 5281.01 | 6724 | 551368 | 9.055 | 4.344 |
| 23 | 72.25 | 415.47 | 529 | 12167 | 4.795 | 2.843 | 83 | 260.75 | 5410.59 | 6889 | 571787 | 9.110 | 4.362 |
| 24 | 75.39 | 452.38 | 576 | 13824 | 4.898 | 2.884 | 84 | 263.89 | 5541.77 | 7056 | 592704 | 9.165 | 4.379 |
| 25 | 78.54 | 490.87 | 625 | 15625 | 5.000 | 2.924 | 85 | 267.03 | 5674.50 | 7225 | 614125 | 9.219 | 4.396 |
| 26 | 81.68 | 530.93 | 676 | 17576 | 5.099 | 2.962 | 86 | 270.17 | 5808.80 | 7396 | 636056 | 9.273 | 4.414 |
| 27 | 84.82 | 572.55 | 729 | 19683 | 5.196 | 3.000 | 87 | 273.31 | 5944.67 | 7569 | 658503 | 9.327 | 4.431 |
| 28 | 87.96 | 615.75 | 784 | 21952 | 5.291 | 3.036 | 88 | 276.46 | 6082.11 | 7744 | 681472 | 9.380 | 4.447 |
| 29 | 91.10 | 660.52 | 841 | 24389 | 5.385 | 3.072 | 89 | 279.60 | 6221.13 | 7921 | 704969 | 9.433 | 4.464 |
| 30 | 94.24 | 706.85 | 900 | 27000 | 5.477 | 3.107 | 90 | 282.74 | 6361.72 | 8100 | 729000 | 9.486 | 4.481 |
| 31 | 97.38 | 754.76 | 961 | 29791 | 5.567 | 3.141 | 91 | 285.88 | 6503.87 | 8281 | 753571 | 9.539 | 4.497 |
| 32 | 100.53 | 804.24 | 1024 | 32768 | 5.656 | 3.174 | 92 | 289.02 | 6647.61 | 8464 | 778688 | 9.591 | 4.514 |
| 33 | 103.67 | 855.29 | 1089 | 35937 | 5.744 | 3.207 | 93 | 292.16 | 6792.90 | 8649 | 804357 | 9.643 | 4.530 |
| 34 | 106.81 | 907.92 | 1156 | 39304 | 5.830 | 3.239 | 94 | 295.31 | 6939.78 | 8836 | 830584 | 9.695 | 4.546 |
| 35 | 109.95 | 962.11 | 1225 | 42875 | 5.916 | 3.271 | 95 | 298.45 | 7088.21 | 9025 | 857375 | 9.746 | 4.562 |
| 36 | 113.09 | 1017.87 | 1296 | 46656 | 6.000 | 3.301 | 96 | 301.59 | 7238.23 | 9216 | 884736 | 9.797 | 4.578 |
| 37 | 116.23 | 1075.21 | 1369 | 50653 | 6.082 | 3.332 | 97 | 304.73 | 7389.81 | 9409 | 912673 | 9.848 | 4.594 |
| 38 | 119.38 | 1134.11 | 1444 | 54872 | 6.164 | 3.361 | 98 | 307.87 | 7542.96 | 9604 | 941192 | 9.899 | 4.610 |
| 39 | 122.52 | 1194.59 | 1521 | 59319 | 6.244 | 3.391 | 99 | 311.01 | 7697.68 | 9801 | 970299 | 9.949 | 4.626 |
| 40 | 125.66 | 1256.63 | 1600 | 64000 | 6.324 | 3.419 | 100 | 314.15 | 7855.97 | 10000 | 1000000 | 10.000 | 4.641 |
| 41 | 128.80 | 1320.25 | 1681 | 68921 | 6.403 | 3.448 | 101 | 317.30 | 8011.86 | 10201 | 1030301 | 10.049 | 4.657 |
| 42 | 131.94 | 1385.44 | 1764 | 74088 | 6.480 | 3.476 | 102 | 320.44 | 8171.30 | 10404 | 1061208 | 10.099 | 4.672 |
| 43 | 135.08 | 1452.20 | 1849 | 79507 | 6.557 | 3.503 | 103 | 323.58 | 8332.30 | 10609 | 1092727 | 10.148 | 4.687 |
| 44 | 138.23 | 1520 52 | 1936 | 85184 | 6.633 | 3.530 | 104 | 326.72 | 8494.88 | 10816 | 1124864 | 10.198 | 4.702 |
| 45 | 141.37 | 1590.43 | 2025 | 91125 | 6.708 | 3.556 | 105 | 329.86 | 8659.03 | 11025 | 1157625 | 10.246 | 4.717 |
| 46 | 144.51 | 1661.90 | 2116 | 97336 | 6.782 | 3.583 | 106 | 333.00 | 8824.75 | 11236 | 1191016 | 10.295 | 4.732 |
| 47 | 147.65 | 1734.94 | 2209 | 103823 | 6.855 | 3.608 | 107 | 336.15 | 8992.04 | 11449 | 1225043 | 10.344 | 4.747 |
| 48 | 150.79 | 1809.55 | 2304 | 110592 | 6.928 | 3.634 | 108 | 339.29 | 9160.90 | 11664 | 1259712 | 10.392 | 4.762 |
| 49 | 153.93 | 1885.74 | 2401 | 117649 | 7.000 | 3.659 | 109 | 342.43 | 9331.33 | 11881 | 1295029 | 10.440 | 4.776 |
| 50 | 157.08 | 1963.49 | 2500 | 125000 | 7.071 | 3.684 | 110 | 345.57 | 9503.34 | 12100 | 1331000 | 10.488 | 4.791 |
| 51 | 160.22 | 2042.82 | 2601 | 132651 | 7.141 | 3.708 | 111 | 348.71 | 9676.91 | 12321 | 1367631 | 10.535 | 4.805 |
| 52 | 163.36 | 2123.71 | 2704 | 140608 | 7.211 | 3.732 | 112 | 351.85 | 9852.05 | 12544 | 1404928 | 10.583 | 4.820 |
| 53 | 166.50 | 2206.18 | 2809 | 148877 | 7.280 | 3.756 | 113 | 355.01 | 10028.77 | 12769 | 1442897 | 10.630 | 4.834 |
| 54 | 169.64 | 2290.21 | 2916 | 157464 | 7.348 | 3.779 | 114 | 358.14 | 10207.05 | 12996 | 1481544 | 10.677 | 4.848 |
| 55 | 172.78 | 2375.82 | 3025 | 166375 | 7.416 | 3.802 | 115 | 361.28 | 10386.91 | 13225 | 1520875 | 10.723 | 4.862 |
| 56 | 175.92 | 2463.01 | 3136 | 175616 | 7.483 | 3.825 | 116 | 364.42 | 10568.34 | 13456 | 1560896 | 10.770 | 4.876 |
| 57 | 179.07 | 2551.75 | 3249 | 185193 | 7.549 | 3.848 | 117 | 367.56 | 10751.34 | 13689 | 1601613 | 10.816 | 4.890 |
| 58 | 182.21 | 2642.08 | 3364 | 195112 | 7.615 | 3.870 | 118 | 370.70 | 10935.90 | 13924 | 1643032 | 10.862 | 4.904 |
| 59 | 185.35 | 2733.97 | 3481 | 205379 | 7.681 | 3.892 | 119 | 373.85 | 11122.04 | 14161 | 1685159 | 10.908 | 4.918 |
| 60 | 188.49 | 2827.45 | 3600 | 216000 | 7.745 | 3.914 | 120 | 376.99 | 11309.76 | 14400 | 1728000 | 10.954 | 4.932 |

| Nombres. | Circonférence. | Surface. | Carré. | Cube. | Racine carrée. | Racine cubique. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 121 | 380.13 | 11499 | 14641 | 1771561 | 11.000 | 4.946 |
| 122 | 383.27 | 11689 | 14884 | 1815848 | 11.045 | 4.959 |
| 123 | 386.41 | 11882 | 15129 | 1860867 | 11.090 | 4.973 |
| 124 | 389.55 | 12076 | 15376 | 1906624 | 11.135 | 4.986 |
| 125 | 392.70 | 12271 | 15625 | 1953125 | 11.180 | 5.000 |
| 126 | 395.84 | 12469 | 15876 | 2000376 | 11.224 | 5.013 |
| 127 | 398.98 | 12667 | 16129 | 2048383 | 11.269 | 5.026 |
| 128 | 402.12 | 12867 | 16384 | 2097152 | 11.313 | 5.039 |
| 129 | 405.26 | 13069 | 16641 | 2146689 | 11.357 | 5.052 |
| 130 | 408.41 | 13273 | 16900 | 2197000 | 11.401 | 5.065 |
| 131 | 411.54 | 13478 | 17161 | 2248091 | 11.445 | 5.078 |
| 132 | 414.69 | 13684 | 17424 | 2299968 | 11.489 | 5.091 |
| 133 | 417.83 | 13892 | 17689 | 2352637 | 11.532 | 5.104 |
| 134 | 420.97 | 14102 | 17956 | 2406104 | 11.575 | 5.117 |
| 135 | 424.11 | 14313 | 18225 | 2460375 | 11.618 | 5.129 |
| 136 | 427.25 | 14526 | 18496 | 2515456 | 11.661 | 5.142 |
| 137 | 430.39 | 14741 | 18769 | 2571353 | 11.704 | 5.155 |
| 138 | 433.54 | 14957 | 19044 | 2628072 | 11.747 | 5.167 |
| 139 | 436.68 | 15174 | 19321 | 2685619 | 11.789 | 5.180 |
| 140 | 439.82 | 15393 | 19600 | 2744000 | 11.832 | 5.192 |
| 141 | 442.96 | 15614 | 19881 | 2803221 | 11.874 | 5.204 |
| 142 | 446.10 | 15836 | 20164 | 2863288 | 11.916 | 5.217 |
| 143 | 449.24 | 16060 | 20449 | 2924207 | 11.958 | 5.229 |
| 144 | 452.39 | 16286 | 20736 | 2985984 | 12.000 | 5.241 |
| 145 | 455.53 | 16513 | 21025 | 3048625 | 12.041 | 5.253 |
| 146 | 458.67 | 16741 | 21316 | 3112136 | 12.083 | 5.265 |
| 147 | 461.81 | 16971 | 21609 | 3176523 | 12.124 | 5.277 |
| 148 | 464.95 | 17203 | 21904 | 3241792 | 12.165 | 5.289 |
| 149 | 468.09 | 17436 | 22201 | 3307949 | 12.206 | 5.301 |
| 150 | 471.24 | 17671 | 22500 | 3375000 | 12.247 | 5.313 |
| 151 | 474.38 | 17907 | 22801 | 3442951 | 12.288 | 5.325 |
| 152 | 477.52 | 18145 | 23104 | 3511808 | 12.328 | 5.336 |
| 153 | 480.66 | 18385 | 23409 | 3581577 | 12.369 | 5.348 |
| 154 | 483.80 | 18626 | 23716 | 3652264 | 12.409 | 5.360 |
| 155 | 486.94 | 18869 | 24025 | 3723875 | 12.449 | 5.371 |
| 156 | 490.08 | 19113 | 24336 | 3796416 | 12.489 | 5.383 |
| 157 | 493.23 | 19359 | 24649 | 3869893 | 12.529 | 5.394 |
| 158 | 496.37 | 19606 | 24964 | 3944312 | 12.569 | 5.406 |
| 159 | 499.51 | 19855 | 25281 | 4019679 | 12.609 | 5.417 |
| 160 | 502.65 | 20106 | 25600 | 4096000 | 12.649 | 5.428 |
| 161 | 505.79 | 20358 | 25921 | 4173281 | 12.688 | 5.440 |
| 162 | 508.93 | 20612 | 26244 | 4251528 | 12.727 | 5.451 |
| 163 | 512.08 | 20867 | 26569 | 4330747 | 12.767 | 5.462 |
| 164 | 515.22 | 21124 | 26896 | 4410944 | 12.806 | 5.473 |
| 165 | 518.36 | 21382 | 27225 | 4492125 | 12.845 | 5.484 |
| 166 | 521.50 | 21642 | 27556 | 4574296 | 12.884 | 5.495 |
| 167 | 524.64 | 21904 | 27889 | 4657463 | 12.922 | 5.506 |
| 168 | 527.78 | 22167 | 28224 | 4741632 | 12.961 | 5.517 |
| 169 | 530.93 | 22431 | 28561 | 4826809 | 13.000 | 5.528 |
| 170 | 534.07 | 22698 | 28900 | 4913000 | 13.038 | 5.539 |
| 171 | 537.31 | 22965 | 29241 | 5000211 | 13.076 | 5.550 |
| 172 | 540.35 | 23235 | 29584 | 5088448 | 13.114 | 5.561 |
| 173 | 543.49 | 23506 | 29929 | 5177717 | 13.152 | 5.572 |
| 174 | 546.64 | 23778 | 30276 | 5268024 | 13.190 | 5.582 |
| 175 | 549.78 | 24052 | 30625 | 5359375 | 13.228 | 5.593 |
| 176 | 552.92 | 24328 | 30976 | 5451776 | 13.266 | 5.604 |
| 177 | 556.06 | 24605 | 31329 | 5545233 | 13.304 | 5.614 |
| 178 | 559.20 | 24884 | 31684 | 5639752 | 13.341 | 5.625 |
| 179 | 562.34 | 25165 | 32041 | 5735339 | 13.379 | 5.635 |
| 180 | 565.48 | 25446 | 32400 | 5832000 | 13.416 | 5.646 |
| 181 | 568.62 | 25730 | 32761 | 5929741 | 13.453 | 5.656 |
| 182 | 571.77 | 26015 | 33124 | 6028568 | 13.490 | 5.667 |
| 183 | 574.91 | 26302 | 33489 | 6128487 | 13.527 | 5.677 |
| 184 | 578.05 | 26590 | 33856 | 6229504 | 13.564 | 5.687 |
| 185 | 581.19 | 26880 | 34225 | 6331225 | 13.601 | 5.698 |
| 186 | 584.33 | 27171 | 34596 | 6434856 | 13.638 | 5.708 |
| 187 | 587.47 | 27464 | 34969 | 6539203 | 13.674 | 5.718 |
| 188 | 590.62 | 27759 | 35344 | 6644672 | 13.711 | 5.728 |
| 189 | 593.76 | 28055 | 35721 | 6751269 | 13.747 | 5.738 |
| 190 | 596.90 | 28352 | 36100 | 6859000 | 13.784 | 5.748 |
| 191 | 600.04 | 28652 | 36481 | 6967871 | 13.820 | 5.758 |
| 192 | 603.18 | 28952 | 36864 | 7077888 | 13.856 | 5.768 |
| 193 | 606.32 | 29255 | 37249 | 7189057 | 13.892 | 5.778 |
| 194 | 609.47 | 29559 | 37636 | 7301384 | 13.928 | 5.788 |
| 195 | 612.61 | 29864 | 38025 | 7414875 | 13.964 | 5.798 |
| 196 | 615.75 | 30171 | 38416 | 7529536 | 14.000 | 5.808 |
| 197 | 618.89 | 30480 | 38809 | 7645373 | 14.035 | 5.818 |
| 198 | 622.03 | 30790 | 39204 | 7762392 | 14.071 | 5.828 |
| 199 | 625.17 | 31102 | 39601 | 7880599 | 14.106 | 5.838 |
| 200 | 628.32 | 31416 | 40000 | 8000000 | 14.142 | 5.848 |
| 201 | 631.46 | 31730 | 40401 | 8120601 | 14.177 | 5.857 |
| 202 | 634.60 | 32047 | 40804 | 8242408 | 14.212 | 5.867 |
| 203 | 637.74 | 32365 | 41209 | 8365427 | 14.247 | 5.877 |
| 204 | 640.88 | 32685 | 41616 | 8489664 | 14.282 | 5.886 |
| 205 | 644.02 | 33006 | 42025 | 8615125 | 14.317 | 5.896 |
| 206 | 647.16 | 33329 | 42436 | 8741816 | 14.352 | 5.905 |
| 207 | 650.31 | 33653 | 42849 | 8869743 | 14.387 | 5.915 |
| 208 | 653.45 | 33979 | 43264 | 8998912 | 14.422 | 5.924 |
| 209 | 656.59 | 34307 | 43681 | 9129329 | 14.456 | 5.934 |
| 210 | 659.73 | 34636 | 44100 | 9261000 | 14.491 | 5.943 |
| 211 | 662.87 | 34966 | 44521 | 9393931 | 14.525 | 5.953 |
| 212 | 666.01 | 35299 | 44944 | 9528128 | 14.560 | 5.962 |
| 213 | 669.16 | 35632 | 45369 | 9663597 | 14.594 | 5.972 |
| 214 | 672.30 | 35968 | 45796 | 9800344 | 14.628 | 5.981 |
| 215 | 675.44 | 36305 | 46225 | 9938375 | 14.662 | 5.990 |
| 216 | 678.58 | 36643 | 46656 | 10077696 | 14.696 | 6.000 |
| 217 | 681.72 | 36983 | 47089 | 10218313 | 14.730 | 6.009 |
| 218 | 684.86 | 37325 | 47524 | 10360232 | 14.764 | 6.018 |
| 219 | 688.01 | 37668 | 47961 | 10503459 | 14.798 | 6.027 |
| 220 | 691.15 | 38013 | 48400 | 10648000 | 14.832 | 6.036 |
| 221 | 694.29 | 38359 | 48841 | 10793861 | 14.866 | 6.045 |
| 222 | 697.43 | 38707 | 49284 | 10941048 | 14.899 | 6 055 |
| 223 | 700.57 | 39057 | 49729 | 11089567 | 14.933 | 6.064 |
| 224 | 703.71 | 39408 | 50176 | 11239424 | 14.966 | 6.073 |
| 225 | 706.86 | 39760 | 50625 | 11390625 | 15.000 | 6.082 |
| 226 | 710.00 | 40115 | 51076 | 11543176 | 15.033 | 6.091 |
| 227 | 713.14 | 40470 | 51529 | 11697083 | 15.066 | 6.100 |
| 228 | 716.28 | 40828 | 51984 | 11852352 | 15.099 | 6.109 |
| 229 | 719.42 | 41187 | 52441 | 12008989 | 15.132 | 6.118 |
| 230 | 722.56 | 41547 | 52900 | 12167000 | 15.165 | 6.126 |
| 231 | 725.70 | 41909 | 53361 | 12326391 | 15.198 | 6.135 |
| 232 | 728.85 | 42273 | 53824 | 12487168 | 15.231 | 6.144 |
| 233 | 731.99 | 42638 | 54289 | 12649337 | 15.264 | 6.153 |
| 234 | 735.13 | 43005 | 54756 | 12812904 | 15.297 | 6.162 |
| 235 | 738.27 | 43373 | 55225 | 12977875 | 15.329 | 6.171 |
| 236 | 741.41 | 43743 | 55696 | 13144256 | 15.362 | 6 179 |
| 237 | 744.55 | 44115 | 56169 | 13312053 | 15.394 | 6 188 |
| 238 | 747.70 | 44488 | 56644 | 13481272 | 15.427 | 6.197 |
| 239 | 750.84 | 44862 | 57121 | 13651919 | 15.459 | 6.205 |
| 240 | 753.98 | 45239 | 57600 | 13824000 | 15.491 | 6.214 |
| 241 | 757.12 | 45616 | 58081 | 13997521 | 15.524 | 6.223 |
| 242 | 760.26 | 45996 | 58564 | 14172488 | 15.556 | 6.231 |
| 243 | 763.40 | 46377 | 59049 | 14348907 | 15.588 | 6.240 |
| 244 | 766.55 | 46759 | 59536 | 14526784 | 15.620 | 6.248 |
| 245 | 769.69 | 47145 | 60025 | 14706125 | 15.652 | 6.257 |
| 246 | 772.83 | 47529 | 60516 | 14886936 | 15.684 | 6.265 |
| 247 | 775.97 | 47916 | 61009 | 15069223 | 15.716 | 6.274 |
| 248 | 779.11 | 48305 | 61504 | 15252992 | 15.748 | 6.282 |
| 249 | 782.25 | 48695 | 62001 | 15438249 | 15.779 | 6.291 |
| 250 | 785.40 | 49087 | 62500 | 15625000 | 15.811 | 6.299 |

| Nombres. | Circonférence. | Surface. | Carré. | Cube. | Racine carrée. | Racine cubique. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 251 | 788.54 | 49481 | 63001 | 15813251 | 15.842 | 6.307 |
| 252 | 791.68 | 49876 | 63504 | 16003008 | 15.874 | 6.316 |
| 253 | 794.82 | 50272 | 64009 | 16194277 | 15.905 | 6.324 |
| 254 | 797.96 | 50670 | 64516 | 16387064 | 15.937 | 6.333 |
| 255 | 801.10 | 51070 | 65025 | 16581375 | 15.968 | 6.341 |
| 256 | 804.24 | 51471 | 65536 | 16777216 | 16.000 | 6.349 |
| 257 | 807.39 | 51874 | 66049 | 16974593 | 16.031 | 6.357 |
| 258 | 810.53 | 52279 | 66564 | 17173512 | 16.062 | 6.366 |
| 259 | 813.67 | 52685 | 67081 | 17375979 | 16.093 | 6.374 |
| 260 | 816.81 | 53093 | 67600 | 17576000 | 16.124 | 6.382 |
| 261 | 819.97 | 53502 | 68121 | 17779581 | 16.155 | 6.390 |
| 262 | 823.09 | 53912 | 68644 | 17984728 | 16.186 | 6.398 |
| 263 | 826.24 | 54325 | 69169 | 18191447 | 16.217 | 6.406 |
| 264 | 829.38 | 54739 | 69696 | 18399744 | 16.248 | 6.415 |
| 265 | 832.52 | 55154 | 70225 | 18609625 | 16.278 | 6.423 |
| 266 | 835.66 | 55571 | 70756 | 18821096 | 16.309 | 6.431 |
| 267 | 838.80 | 55990 | 71289 | 19034163 | 16.340 | 6.439 |
| 268 | 841 94 | 56410 | 71824 | 19248832 | 16.370 | 6.447 |
| 269 | 845.09 | 56832 | 72361 | 19465109 | 16.401 | 6.455 |
| 270 | 848.23 | 57255 | 72900 | 19683000 | 16.431 | 6.463 |
| 271 | 851.37 | 57680 | 73441 | 19902511 | 16.462 | 6.471 |
| 272 | 854.51 | 58107 | 75984 | 20123648 | 16.492 | 6.479 |
| 273 | 857.65 | 58535 | 74529 | 20346417 | 16.522 | 6.487 |
| 274 | 860.79 | 58964 | 75076 | 20570824 | 16.552 | 6.495 |
| 275 | 863.94 | 59395 | 75625 | 20796875 | 16.583 | 6.502 |
| 276 | 867.08 | 59828 | 76176 | 21024576 | 16.613 | 6.510 |
| 277 | 870.22 | 60262 | 76729 | 21253933 | 16.643 | 6.518 |
| 278 | 873.36 | 60698 | 77284 | 21484952 | 16.673 | 6.526 |
| 279 | 876.50 | 61136 | 77841 | 21717639 | 16.703 | 6.534 |
| 280 | 879.64 | 61575 | 78400 | 21952000 | 16.733 | 6.542 |
| 281 | 882.78 | 62015 | 78961 | 22188041 | 16.763 | 6.549 |
| 282 | 885.93 | 62458 | 79524 | 22425768 | 16.792 | 6.557 |
| 283 | 889.07 | 62901 | 80089 | 22665187 | 16 822 | 6.565 |
| 284 | 892.21 | 63347 | 80656 | 22906304 | 16.852 | 6.573 |
| 285 | 895.35 | 63794 | 81225 | 23149125 | 16.881 | 6.580 |
| 286 | 898.49 | 64242 | 81796 | 23393656 | 16.911 | 6.588 |
| 287 | 901.63 | 64692 | 82369 | 23639903 | 16.941 | 6.596 |
| 288 | 904.78 | 65144 | 82944 | 23887872 | 16.970 | 6.603 |
| 289 | 907 92 | 65597 | 85521 | 24137569 | 17.000 | 6.611 |
| 290 | 911.06 | 66052 | 84100 | 24389000 | 17.029 | 6.619 |
| 291 | 914.20 | 66508 | 84681 | 24642171 | 17.059 | 6.627 |
| 292 | 917.34 | 66966 | 85264 | 24897088 | 17.088 | 6.634 |
| 293 | 920.48 | 67425 | 85849 | 25153757 | 17.117 | 6.642 |
| 294 | 923.63 | 67886 | 86436 | 25412184 | 17.146 | 6.649 |
| 295 | 926.77 | 68349 | 87025 | 25672375 | 17.176 | 6.657 |
| 296 | 929.91 | 68815 | 87616 | 25934336 | 17.205 | 6.664 |
| 297 | 933.05 | 69279 | 88209 | 26198073 | 17.234 | 6.672 |
| 298 | 936.19 | 69746 | 88804 | 26463592 | 17.263 | 6.679 |
| 299 | 939.33 | 70215 | 89401 | 26730899 | 17.292 | 6.687 |
| 300 | 942.48 | 70686 | 90000 | 27000000 | 17.320 | 6.694 |
| 301 | 945.62 | 71158 | 90601 | 27270901 | 17.349 | 6.702 |
| 302 | 948.76 | 71631 | 91204 | 27543608 | 17.378 | 6.709 |
| 303 | 951.90 | 72106 | 91809 | 27818127 | 17.407 | 6.717 |
| 304 | 955.04 | 72583 | 92416 | 28094464 | 17.436 | 6.724 |
| 305 | 958.18 | 73061 | 93025 | 28372625 | 17.464 | 6.731 |
| 306 | 961.32 | 73541 | 93636 | 28652616 | 17.493 | 6.739 |
| 307 | 964.47 | 74023 | 94249 | 28934443 | 17.521 | 6.746 |
| 308 | 967.61 | 74506 | 94864 | 29218112 | 17.549 | 6.753 |
| 309 | 970.75 | 74990 | 95481 | 29503629 | 17.578 | 6.761 |
| 310 | 973.89 | 75476 | 96100 | 29791000 | 17.607 | 6.768 |
| 311 | 977.03 | 75964 | 96721 | 30080231 | 17.635 | 6.775 |
| 312 | 980.17 | 76453 | 97344 | 30371328 | 17.663 | 6.782 |
| 313 | 983.32 | 76944 | 97969 | 30664297 | 17.692 | 6.789 |
| 314 | 986.45 | 77437 | 98596 | 30959144 | 17.720 | 6.797 |
| 315 | 989.60 | 77931 | 99225 | 31255875 | 17.748 | 6.804 |
| 316 | 992.74 | 78426 | 99856 | 31554496 | 17.776 | 6.811 |
| 317 | 995.88 | 78924 | 100489 | 31855013 | 17.804 | 6.818 |
| 318 | 999.02 | 79422 | 101124 | 32157432 | 17.832 | 6.826 |
| 319 | 1002.17 | 79923 | 101761 | 32461759 | 17.860 | 6.833 |
| 320 | 1005.31 | 80424 | 102400 | 32768000 | 17.888 | 6.839 |
| 321 | 1008.45 | 80928 | 103041 | 33076161 | 17.916 | 6.847 |
| 322 | 1011.59 | 81433 | 103684 | 33386248 | 17.944 | 6.854 |
| 323 | 1014.73 | 81939 | 104329 | 33698267 | 17.972 | 6.861 |
| 324 | 1017.88 | 82448 | 104976 | 34012224 | 18.000 | 6.868 |
| 325 | 1021.02 | 82957 | 105625 | 34328125 | 18.028 | 6.875 |
| 326 | 1024.16 | 83469 | 106276 | 34645976 | 18.055 | 6.882 |
| 327 | 1027.30 | 83982 | 106929 | 34965783 | 18.083 | 6.889 |
| 328 | 1030.44 | 84496 | 107584 | 35287552 | 18.111 | 6.896 |
| 329 | 1033.58 | 85012 | 108241 | 35611289 | 18.138 | 6.903 |
| 330 | 1036.72 | 85530 | 108900 | 35937000 | 18.166 | 6.910 |
| 331 | 1039.86 | 86049 | 109561 | 36264691 | 18.193 | 6.917 |
| 332 | 1043.01 | 86569 | 110224 | 36594368 | 18.221 | 6.924 |
| 333 | 1046.15 | 87092 | 110889 | 36926037 | 18.248 | 6.931 |
| 334 | 1049.29 | 87616 | 111556 | 37259704 | 18.276 | 6.938 |
| 335 | 1052.43 | 88141 | 112225 | 37595375 | 18.303 | 6.945 |
| 336 | 1055.57 | 88668 | 112896 | 37933056 | 18.330 | 6.952 |
| 337 | 1058.71 | 89197 | 113569 | 38272753 | 18.357 | 6.959 |
| 338 | 1061.86 | 89727 | 114244 | 38614472 | 18.385 | 6.966 |
| 339 | 1065.00 | 90258 | 114921 | 38958219 | 18 412 | 6.973 |
| 340 | 1068.14 | 90792 | 115600 | 39304000 | 18.439 | 6.979 |
| 341 | 1071.28 | 91327 | 116281 | 39651821 | 18.466 | 6.986 |
| 342 | 1074.42 | 91863 | 116964 | 40001688 | 18.493 | 6.993 |
| 343 | 1077.56 | 92401 | 117649 | 40353607 | 18.520 | 7.000 |
| 344 | 1080.71 | 92941 | 118336 | 40707584 | 18.547 | 7.007 |
| 345 | 1083.85 | 93482 | 119025 | 41063625 | 18.574 | 7.014 |
| 346 | 1086.99 | 94024 | 119716 | 41421736 | 18.601 | 7.020 |
| 347 | 1090.13 | 94569 | 120409 | 41781923 | 18.628 | 7.027 |
| 348 | 1095.27 | 95115 | 121104 | 42144192 | 18.655 | 7.034 |
| 349 | 1096.41 | 95662 | 121801 | 42508549 | 18.681 | 7.040 |
| 350 | 1099.56 | 96211 | 122500 | 42875000 | 18.708 | 7.047 |
| 351 | 1102.70 | 96762 | 123201 | 43243551 | 18.735 | 7.054 |
| 352 | 1105.84 | 97314 | 123904 | 43614208 | 18.762 | 7.061 |
| 353 | 1108.98 | 97867 | 124609 | 43986977 | 18.788 | 7.067 |
| 354 | 1112.12 | 98423 | 125316 | 44361864 | 18.815 | 7.074 |
| 355 | 1115.26 | 98980 | 126025 | 44738875 | 18.842 | 7.081 |
| 356 | 1118.40 | 99538 | 126736 | 45118016 | 18.868 | 7.087 |
| 357 | 1121.55 | 100098 | 127449 | 45499293 | 18.894 | 7.094 |
| 358 | 1124.69 | 100660 | 128164 | 45882712 | 18.921 | 7.101 |
| 359 | 1127.83 | 101223 | 128881 | 46268279 | 18.947 | 7.107 |
| 360 | 1130.97 | 101787 | 129600 | 46656000 | 18.974 | 7.114 |
| 361 | 1134.11 | 102354 | 130321 | 47045881 | 19.000 | 7.120 |
| 362 | 1137.25 | 102921 | 131044 | 47437928 | 19.026 | 7.127 |
| 363 | 1140.40 | 103491 | 131769 | 47832147 | 19.052 | 7.133 |
| 364 | 1143.54 | 104062 | 132496 | 48228544 | 19.079 | 7.140 |
| 365 | 1146.68 | 104634 | 133225 | 48627125 | 19.105 | 7.146 |
| 366 | 1149.82 | 105209 | 133956 | 49027896 | 19.131 | 7.153 |
| 367 | 1152.96 | 105784 | 134689 | 49430863 | 19.157 | 7.159 |
| 368 | 1156.10 | 106362 | 135424 | 49836032 | 19.183 | 7.166 |
| 369 | 1159.25 | 106940 | 136161 | 50243409 | 19.209 | 7.172 |
| 370 | 1162.39 | 107521 | 136900 | 50653000 | 19.235 | 7.179 |
| 371 | 1165.53 | 108103 | 137641 | 51064811 | 19.261 | 7.185 |
| 372 | 1168.67 | 108686 | 138384 | 51478848 | 19.287 | 7.192 |
| 373 | 1171.81 | 109271 | 139129 | 51895117 | 19.313 | 7.198 |
| 374 | 1174.95 | 109858 | 139876 | 52313624 | 19.339 | 7.205 |
| 375 | 1178.10 | 110446 | 140625 | 52734375 | 19.365 | 7.211 |
| 376 | 1181.24 | 111036 | 141376 | 53157376 | 19.391 | 7.218 |
| 377 | 1184.38 | 111628 | 142129 | 53582633 | 19.416 | 7.224 |
| 378 | 1187.52 | 112221 | 142884 | 54010152 | 19.442 | 7.230 |
| 379 | 1190.66 | 112815 | 143641 | 54439939 | 19.468 | 7.237 |
| 380 | 1193.80 | 113411 | 144400 | 54872000 | 19 493 | 7.243 |

| Nombres. | Circonférence. | Surface. | Carré. | Cube. | Racine carrée. | Racine cubique. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 381 | 1196.94 | 114009 | 145161 | 55306541 | 19.519 | 7.249 |
| 382 | 1200.09 | 114608 | 145924 | 55742968 | 19.545 | 7.256 |
| 383 | 1203.25 | 115209 | 146689 | 56181887 | 19.570 | 7.262 |
| 384 | 1206.37 | 115811 | 147456 | 56623104 | 19.596 | 7.268 |
| 385 | 1209.51 | 116415 | 148225 | 57066625 | 19.621 | 7.275 |
| 386 | 1212.65 | 117021 | 148996 | 57512456 | 19.647 | 7.281 |
| 387 | 1215.79 | 117628 | 149769 | 57960603 | 19.672 | 7.287 |
| 388 | 1218.94 | 118237 | 150544 | 58411072 | 19.698 | 7.294 |
| 389 | 1222.08 | 118847 | 151321 | 58863869 | 19.723 | 7.299 |
| 390 | 1225.22 | 119459 | 152100 | 59319000 | 19.748 | 7.306 |
| 391 | 1228.36 | 120072 | 152881 | 59776471 | 19.774 | 7.312 |
| 392 | 1231.50 | 120687 | 153664 | 60236288 | 19.799 | 7.319 |
| 393 | 1234.64 | 121304 | 154449 | 60698457 | 19.824 | 7.325 |
| 394 | 1237.79 | 121922 | 155236 | 61162984 | 19.849 | 7.331 |
| 395 | 1240.93 | 122542 | 156025 | 61629875 | 19.875 | 7.337 |
| 396 | 1244.07 | 123163 | 156816 | 62099136 | 19.899 | 7.343 |
| 397 | 1247.21 | 123786 | 157609 | 62570773 | 19.925 | 7.349 |
| 398 | 1250.35 | 124410 | 158404 | 63044792 | 19.949 | 7.356 |
| 399 | 1253.49 | 125036 | 159201 | 63521199 | 19.975 | 7.362 |
| 400 | 1256.64 | 125664 | 160000 | 64000000 | 20.000 | 7.368 |
| 401 | 1259.78 | 126293 | 160801 | 64481201 | 20.025 | 7.374 |
| 402 | 1262.92 | 126923 | 161604 | 64964808 | 20.049 | 7.380 |
| 403 | 1266.06 | 127556 | 162409 | 65450827 | 20.075 | 7.386 |
| 404 | 1269.20 | 128189 | 163216 | 65939264 | 20.099 | 7.392 |
| 405 | 1272.34 | 128825 | 164025 | 66430125 | 20.125 | 7.399 |
| 406 | 1275.48 | 129462 | 164836 | 66925416 | 20.149 | 7.405 |
| 407 | 1278.63 | 130100 | 165649 | 67419143 | 20.174 | 7.411 |
| 408 | 1281.77 | 130740 | 166464 | 67914312 | 20.199 | 7.417 |
| 409 | 1284.91 | 131382 | 167281 | 68417929 | 20.224 | 7.422 |
| 410 | 1288.05 | 132025 | 168100 | 68921000 | 20.248 | 7.429 |
| 411 | 1291.19 | 132670 | 168921 | 69426531 | 20.273 | 7.434 |
| 412 | 1294.34 | 133316 | 169744 | 69934528 | 20.298 | 7.441 |
| 413 | 1297.48 | 133964 | 170569 | 70444997 | 20.322 | 7.447 |
| 414 | 1300.62 | 134614 | 171396 | 70957944 | 20.347 | 7.453 |
| 415 | 1303.76 | 135265 | 172225 | 71473375 | 20.371 | 7.459 |
| 416 | 1306.90 | 135918 | 173056 | 71991296 | 20.396 | 7.465 |
| 417 | 1310.04 | 136572 | 173889 | 72511713 | 20.421 | 7.471 |
| 418 | 1313.18 | 137228 | 174724 | 73034632 | 20.445 | 7.477 |
| 419 | 1316.32 | 137885 | 175561 | 73560059 | 20.469 | 7.483 |
| 420 | 1319.47 | 138544 | 176400 | 74088000 | 20.494 | 7.489 |
| 421 | 1322.61 | 139205 | 177241 | 74615461 | 20.518 | 7.495 |
| 422 | 1325.75 | 139867 | 178084 | 75151448 | 20.543 | 7.501 |
| 423 | 1328.89 | 140530 | 178929 | 75686967 | 20.567 | 7.507 |
| 424 | 1332.03 | 141196 | 179776 | 76225024 | 20.591 | 7.513 |
| 425 | 1335.18 | 141862 | 180625 | 76765625 | 20.615 | 7.518 |
| 426 | 1338.32 | 142531 | 181476 | 77308776 | 20.639 | 7.524 |
| 427 | 1341.46 | 143201 | 182329 | 77854483 | 20.664 | 7.530 |
| 428 | 1344.60 | 143872 | 183184 | 78402752 | 20.688 | 7.536 |
| 429 | 1347.74 | 144545 | 184041 | 78953589 | 20.712 | 7.542 |
| 430 | 1350.88 | 145220 | 184900 | 79507000 | 20.736 | 7.548 |
| 431 | 1354.02 | 145896 | 185761 | 80062991 | 20.760 | 7.554 |
| 432 | 1357.17 | 146574 | 186624 | 80621568 | 20.785 | 7.559 |
| 433 | 1360.32 | 147253 | 187489 | 81182737 | 20.809 | 7.565 |
| 434 | 1363.45 | 147934 | 188356 | 81746504 | 20.833 | 7.571 |
| 435 | 1366.59 | 148617 | 189225 | 82312875 | 20.857 | 7.577 |
| 436 | 1369.73 | 149301 | 190096 | 82881856 | 20.881 | 7.583 |
| 437 | 1372.87 | 149987 | 190969 | 83453453 | 20.904 | 7.588 |
| 438 | 1376.02 | 150674 | 191844 | 84027672 | 20.928 | 7.594 |
| 439 | 1379.16 | 151362 | 192721 | 84604519 | 20.952 | 7.600 |
| 440 | 1382.30 | 152053 | 193600 | 85184000 | 20.976 | 7.606 |
| 441 | 1385.44 | 152745 | 194481 | 85766121 | 21.000 | 7.612 |
| 442 | 1388.58 | 153438 | 195364 | 86350888 | 21.024 | 7.617 |
| 443 | 1391.72 | 154133 | 196249 | 86938307 | 21.047 | 7.623 |
| 444 | 1394.87 | 154830 | 197136 | 87528384 | 21.071 | 7.629 |
| 445 | 1398.01 | 155528 | 198025 | 88121125 | 21.095 | 7.635 |
| 446 | 1401.15 | 156228 | 198916 | 88716536 | 21.119 | 7.640 |
| 447 | 1404.29 | 156929 | 199809 | 89314623 | 21.142 | 7.646 |
| 448 | 1407.43 | 157632 | 200704 | 89915392 | 21.166 | 7.652 |
| 449 | 1410.57 | 158337 | 201601 | 90518849 | 21.189 | 7.657 |
| 450 | 1413.72 | 159043 | 202500 | 91125000 | 21.213 | 7.663 |
| 451 | 1416.86 | 159751 | 203401 | 91733851 | 21.237 | 7.669 |
| 452 | 1420.00 | 160460 | 204304 | 92345408 | 21.260 | 7.674 |
| 453 | 1423.14 | 161171 | 205209 | 92959677 | 21.284 | 7.680 |
| 454 | 1426.28 | 161883 | 206116 | 93576664 | 21.307 | 7.686 |
| 455 | 1429.42 | 162597 | 207025 | 94196375 | 21.331 | 7.691 |
| 456 | 1432.56 | 163312 | 207936 | 94818816 | 21.354 | 7.697 |
| 457 | 1435.71 | 164030 | 208849 | 95443993 | 21.377 | 7.703 |
| 458 | 1438.85 | 164748 | 209764 | 96071912 | 21.401 | 7.708 |
| 459 | 1441.99 | 165468 | 210681 | 96702579 | 21.424 | 7.714 |
| 460 | 1445.13 | 166190 | 211600 | 97336000 | 21.447 | 7.719 |
| 461 | 1448.27 | 166913 | 212521 | 97972181 | 21.471 | 7.725 |
| 462 | 1451.41 | 167638 | 213444 | 98611128 | 21.494 | 7.731 |
| 463 | 1454.56 | 168365 | 214369 | 99252847 | 21.517 | 7.736 |
| 464 | 1457.70 | 169093 | 215296 | 99897344 | 21.541 | 7.742 |
| 465 | 1460.84 | 169823 | 216225 | 100544625 | 21.564 | 7.747 |
| 466 | 1463.98 | 170554 | 217156 | 101194696 | 21.587 | 7.753 |
| 467 | 1467.12 | 171287 | 218089 | 101847563 | 21.610 | 7.758 |
| 468 | 1470.26 | 172021 | 219024 | 102503232 | 21.633 | 7.764 |
| 469 | 1473.41 | 172757 | 219961 | 103161709 | 21.656 | 7.769 |
| 470 | 1476.55 | 173494 | 220900 | 103823000 | 21.679 | 7.775 |
| 471 | 1479.69 | 174233 | 221841 | 104487111 | 21.702 | 7.780 |
| 472 | 1482.83 | 174974 | 222784 | 105154048 | 21.725 | 7.786 |
| 473 | 1485.97 | 175716 | 223729 | 105823817 | 21.749 | 7.791 |
| 474 | 1489.11 | 176460 | 224676 | 106496424 | 21.771 | 7.897 |
| 475 | 1492.26 | 177205 | 225625 | 107171875 | 21.794 | 7.802 |
| 476 | 1495.40 | 177952 | 226576 | 107850176 | 21.817 | 7.808 |
| 477 | 1498.54 | 178701 | 227529 | 108531333 | 21.840 | 7.813 |
| 478 | 1501.68 | 179451 | 228484 | 109215352 | 21.863 | 7.819 |
| 479 | 1504.82 | 180202 | 229441 | 109902239 | 21.886 | 7.824 |
| 480 | 1507.96 | 180956 | 230400 | 110592000 | 21.909 | 7.830 |
| 481 | 1511.10 | 181710 | 231361 | 111284641 | 21.932 | 7.835 |
| 482 | 1514.25 | 182467 | 232324 | 111980168 | 21.954 | 7.840 |
| 483 | 1517.39 | 183225 | 233289 | 112678587 | 21.977 | 7.846 |
| 484 | 1520.53 | 183984 | 234256 | 113379904 | 22.000 | 7.851 |
| 485 | 1523.67 | 184745 | 235225 | 114084125 | 22.023 | 7.857 |
| 486 | 1526.81 | 185508 | 236196 | 114791256 | 22.045 | 7.862 |
| 487 | 1529.95 | 186272 | 237169 | 115501303 | 22.069 | 7.868 |
| 488 | 1533.10 | 187038 | 238144 | 116214272 | 22.091 | 7.873 |
| 489 | 1536.24 | 187805 | 239121 | 116930169 | 22.115 | 7.878 |
| 490 | 1539.38 | 188574 | 240100 | 117649000 | 22.136 | 7.884 |
| 491 | 1542.52 | 189345 | 241081 | 118370771 | 22.158 | 7.889 |
| 492 | 1545.66 | 190117 | 242064 | 119095488 | 22.181 | 7.894 |
| 493 | 1548.80 | 190890 | 243049 | 119823157 | 22.204 | 7.899 |
| 494 | 1551.95 | 191665 | 244036 | 120553784 | 22.226 | 7.905 |
| 495 | 1555.09 | 192442 | 245025 | 121287375 | 22.248 | 7.910 |
| 496 | 1558.23 | 193220 | 246016 | 122023936 | 22.271 | 7.915 |
| 497 | 1561.37 | 194000 | 247009 | 122763473 | 22.293 | 7.921 |
| 498 | 1564.51 | 194782 | 248004 | 123505992 | 22.316 | 7.926 |
| 499 | 1567.65 | 195565 | 249001 | 124251499 | 22.338 | 7.932 |
| 500 | 1570.80 | 196350 | 250000 | 125000000 | 22.361 | 7.937 |
| 501 | 1573.94 | 197136 | 251001 | 125751501 | 22.383 | 7.942 |
| 502 | 1577.08 | 197923 | 252004 | 126506008 | 22.405 | 7.947 |
| 503 | 1580.22 | 198713 | 253009 | 127265527 | 22.428 | 7.953 |
| 504 | 1583.36 | 199504 | 254016 | 128024064 | 22.449 | 7.958 |
| 505 | 1586.50 | 200296 | 255025 | 128787625 | 22.472 | 7.963 |
| 506 | 1589.64 | 201090 | 256036 | 129554216 | 22.494 | 7.969 |
| 507 | 1592.79 | 201886 | 257049 | 130323843 | 22.517 | 7.974 |
| 508 | 1595.93 | 202683 | 258064 | 131096512 | 22.539 | 7.979 |
| 509 | 1599.07 | 203481 | 259081 | 131872229 | 22.561 | 7.984 |
| 510 | 1602.21 | 204282 | 260100 | 132651000 | 22.583 | 7.989 |

| Nombres. | Circonférence. | Surface. | Carré. | Cube. | Racine carrée. | Racine cubique. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 511 | 1605.35 | 205084 | 261121 | 133432831 | 22.605 | 7.995 |
| 512 | 1608.49 | 205887 | 262144 | 134217728 | 22.627 | 8.000 |
| 513 | 1611.64 | 206692 | 263169 | 135005697 | 22.649 | 8.005 |
| 514 | 1614.78 | 207499 | 264196 | 135796744 | 22.671 | 8.010 |
| 515 | 1617.92 | 208307 | 265225 | 136590875 | 22.694 | 8.016 |
| 516 | 1621.06 | 209117 | 266256 | 137388096 | 22.716 | 8.021 |
| 517 | 1624.20 | 209928 | 267289 | 138188413 | 22.738 | 8.026 |
| 518 | 1627.34 | 210741 | 268324 | 138991832 | 22.750 | 8.031 |
| 519 | 1630.49 | 211556 | 269361 | 139798359 | 22.782 | 8.036 |
| 520 | 1633.63 | 212372 | 270400 | 140608000 | 22.805 | 8.041 |
| 521 | 1636.77 | 213189 | 271441 | 141420761 | 22.825 | 8.047 |
| 522 | 1639.91 | 214008 | 272484 | 142236648 | 22.847 | 8.052 |
| 523 | 1643.05 | 214829 | 273529 | 143055667 | 22.869 | 8.057 |
| 524 | 1646.19 | 215651 | 274576 | 143877824 | 22.891 | 8.062 |
| 525 | 1649.34 | 216475 | 275625 | 144703125 | 22.913 | 8.067 |
| 526 | 1652.48 | 217301 | 276676 | 145531576 | 22.935 | 8.072 |
| 527 | 1655.62 | 218128 | 277729 | 146363183 | 22.956 | 8.077 |
| 528 | 1658.76 | 218956 | 278784 | 147197952 | 22.978 | 8.082 |
| 529 | 1661.90 | 219787 | 279841 | 148035889 | 23.000 | 8.087 |
| 530 | 1665.04 | 220618 | 280900 | 148877000 | 23.022 | 8.093 |
| 531 | 1668.18 | 221452 | 281961 | 149721291 | 23.043 | 8.098 |
| 532 | 1671.33 | 222287 | 283024 | 150568768 | 23.065 | 8.103 |
| 533 | 1674.47 | 223123 | 284089 | 151419437 | 23.087 | 8.108 |
| 534 | 1677.61 | 223961 | 285156 | 152273304 | 23.108 | 8.113 |
| 535 | 1680.75 | 224801 | 286225 | 153130375 | 23.130 | 8.118 |
| 536 | 1683.89 | 225642 | 287296 | 153990656 | 23.152 | 8.123 |
| 537 | 1687.04 | 226484 | 288369 | 154854153 | 23.173 | 8.128 |
| 538 | 1690.18 | 227329 | 289444 | 155720872 | 23.195 | 8.133 |
| 539 | 1693.32 | 228175 | 290521 | 156590819 | 23.216 | 8.138 |
| 540 | 1696.46 | 229022 | 291600 | 157464000 | 23.238 | 8.143 |
| 541 | 1699.60 | 229871 | 292681 | 158340421 | 23.259 | 8.148 |
| 542 | 1702.74 | 230722 | 293764 | 159220088 | 23.281 | 8.153 |
| 543 | 1705.88 | 231574 | 294849 | 160103007 | 23.302 | 8.158 |
| 544 | 1709.03 | 232428 | 295936 | 160989184 | 23.324 | 8.165 |
| 545 | 1712.17 | 233283 | 297025 | 161878625 | 23.345 | 8.168 |
| 546 | 1715.31 | 234140 | 298116 | 162771336 | 23.367 | 8.173 |
| 547 | 1718.45 | 234998 | 299209 | 163667323 | 23.388 | 8.178 |
| 548 | 1721.59 | 235858 | 300304 | 164566592 | 23.409 | 8.183 |
| 549 | 1724.73 | 236720 | 301401 | 165469149 | 23.431 | 8.188 |
| 550 | 1727.88 | 237585 | 302500 | 166375000 | 23.452 | 8.193 |
| 551 | 1731.02 | 238448 | 303601 | 167284151 | 23.473 | 8.198 |
| 552 | 1734.16 | 239314 | 304704 | 168196608 | 23.495 | 8.203 |
| 553 | 1737.30 | 240182 | 305809 | 169112377 | 23.516 | 8.208 |
| 554 | 1740.44 | 241051 | 306916 | 170031464 | 23.537 | 8.213 |
| 555 | 1743.58 | 241922 | 308025 | 170953875 | 23.558 | 8.218 |
| 556 | 1746.72 | 242795 | 309136 | 171879616 | 23.579 | 8.223 |
| 557 | 1749.87 | 243669 | 310249 | 172808693 | 23.601 | 8.228 |
| 558 | 1753.01 | 244545 | 311364 | 173741112 | 23.622 | 8.233 |
| 559 | 1756.15 | 245422 | 312481 | 174676879 | 23.643 | 8.238 |
| 560 | 1759.29 | 246301 | 313600 | 175616000 | 23.664 | 8.242 |
| 561 | 1762.43 | 247181 | 314721 | 176558481 | 23.685 | 8.247 |
| 562 | 1765.57 | 248063 | 315844 | 177504328 | 23.706 | 8.252 |
| 563 | 1768.72 | 248947 | 316969 | 178453547 | 23.728 | 8.257 |
| 564 | 1771.86 | 249832 | 318096 | 179406144 | 23.749 | 8.262 |
| 565 | 1775.00 | 250719 | 319225 | 180362125 | 23.769 | 8.267 |
| 566 | 1778.14 | 251607 | 320356 | 181321496 | 23.791 | 8.272 |
| 567 | 1781.28 | 252497 | 321489 | 182284263 | 23.812 | 8.277 |
| 568 | 1784.42 | 253388 | 322624 | 183250432 | 23.833 | 8.282 |
| 569 | 1787.57 | 254281 | 323761 | 184220009 | 23.854 | 8.286 |
| 570 | 1790.71 | 255176 | 324900 | 185193000 | 23.875 | 8.291 |
| 571 | 1793.85 | 256072 | 326041 | 186169411 | 23.896 | 8.296 |
| 572 | 1796.99 | 256970 | 327184 | 187149248 | 23.916 | 8.301 |
| 573 | 1800.13 | 257869 | 328329 | 188132517 | 23.937 | 8.306 |
| 574 | 1803.27 | 258770 | 329476 | 189119224 | 23.958 | 8.311 |
| 575 | 1806.42 | 259672 | 330625 | 190109375 | 23.979 | 8.315 |
| 576 | 1809.56 | 260576 | 331776 | 191102976 | 24.000 | 8.320 |
| 577 | 1812.70 | 261482 | 332929 | 192100033 | 24.021 | 8.325 |
| 578 | 1815.84 | 262388 | 334084 | 193100552 | 24.042 | 8.330 |
| 579 | 1818.98 | 263298 | 335241 | 194104539 | 24.062 | 8.335 |
| 580 | 1822.12 | 264208 | 336400 | 195112000 | 24.083 | 8.339 |
| 581 | 1825.26 | 265120 | 337561 | 196122941 | 24.104 | 8.344 |
| 582 | 1828.41 | 266033 | 338724 | 197137368 | 24.125 | 8.349 |
| 583 | 1831.55 | 266948 | 339889 | 198155287 | 24.145 | 8.354 |
| 584 | 1834.69 | 267865 | 341056 | 199176704 | 24.166 | 8.359 |
| 585 | 1837.83 | 268783 | 342225 | 200201625 | 24.187 | 8.365 |
| 586 | 1840.97 | 269703 | 343396 | 201230056 | 24.207 | 8.368 |
| 587 | 1844.11 | 270624 | 344569 | 202262003 | 24.228 | 8.375 |
| 588 | 1847.26 | 271547 | 345744 | 203297472 | 24.249 | 8.378 |
| 589 | 1850.40 | 272471 | 346921 | 204336469 | 24.269 | 8.382 |
| 590 | 1853.54 | 273397 | 348100 | 205379000 | 24.289 | 8.387 |
| 591 | 1856.68 | 274325 | 349281 | 206425071 | 24.310 | 8.392 |
| 592 | 1859.82 | 275254 | 350464 | 207474688 | 24.331 | 8.397 |
| 593 | 1862.96 | 276185 | 351649 | 208527857 | 24.351 | 8.401 |
| 594 | 1866.11 | 277117 | 352836 | 209584584 | 24.372 | 8.406 |
| 595 | 1869.25 | 278051 | 354025 | 210644875 | 24.393 | 8.411 |
| 596 | 1872.39 | 278986 | 355216 | 211708736 | 24.415 | 8.415 |
| 597 | 1875.53 | 279923 | 356409 | 212776173 | 24.433 | 8.420 |
| 598 | 1878.67 | 280862 | 357604 | 213847192 | 24.454 | 8.425 |
| 599 | 1881.81 | 281802 | 358801 | 214921799 | 24.474 | 8.429 |
| 600 | 1884.96 | 282744 | 360000 | 216000000 | 24.495 | 8.434 |
| 601 | 1888.10 | 283687 | 361201 | 217081801 | 24.515 | 8.439 |
| 602 | 1891.24 | 284632 | 362404 | 218167208 | 24.536 | 8.444 |
| 603 | 1894.38 | 285578 | 363609 | 219256227 | 24.556 | 8.448 |
| 604 | 1897.52 | 286526 | 364816 | 220348864 | 24.576 | 8.453 |
| 605 | 1900.66 | 287476 | 366025 | 221445125 | 24.597 | 8.458 |
| 606 | 1903.80 | 288426 | 367236 | 222545016 | 24.617 | 8.462 |
| 607 | 1906.95 | 289379 | 368449 | 223648543 | 24.637 | 8.467 |
| 608 | 1910.09 | 290334 | 369664 | 224755712 | 24.658 | 8.472 |
| 609 | 1913.23 | 291289 | 370881 | 225866529 | 24.678 | 8.476 |
| 610 | 1916.37 | 292247 | 372100 | 226981000 | 24.698 | 8.481 |
| 611 | 1919.51 | 293206 | 373321 | 228099131 | 24.718 | 8.485 |
| 612 | 1922.65 | 294166 | 374544 | 229220928 | 24.739 | 8.490 |
| 613 | 1925.80 | 295128 | 375769 | 230346397 | 24.758 | 8.495 |
| 614 | 1928.94 | 296092 | 376996 | 231475544 | 24.779 | 8.499 |
| 615 | 1932.08 | 297057 | 378225 | 232608375 | 24.799 | 8.504 |
| 616 | 1935.22 | 298024 | 379456 | 233744896 | 24.819 | 8.509 |
| 617 | 1938.36 | 298993 | 380689 | 234885113 | 24.839 | 8.513 |
| 618 | 1941.50 | 299965 | 381924 | 236029032 | 24.859 | 8.518 |
| 619 | 1944.65 | 300934 | 383161 | 237176659 | 24.879 | 8.522 |
| 620 | 1947.79 | 301907 | 384400 | 238328000 | 24.899 | 8.527 |
| 621 | 1950.93 | 302882 | 385641 | 239483061 | 24.919 | 8.532 |
| 622 | 1954.07 | 303858 | 386884 | 240641848 | 24.939 | 8.536 |
| 623 | 1957.21 | 304856 | 388129 | 241804367 | 24.959 | 8.541 |
| 624 | 1960.35 | 305815 | 389376 | 242970624 | 24.980 | 8.545 |
| 625 | 1963.50 | 306796 | 390625 | 244140625 | 25.000 | 8.549 |
| 626 | 1966.64 | 307779 | 391876 | 245314376 | 25.019 | 8.554 |
| 627 | 1969.78 | 308763 | 393129 | 246491883 | 25.040 | 8.559 |
| 628 | 1972.92 | 309749 | 394384 | 247673152 | 25.059 | 8.563 |
| 629 | 1976.06 | 310736 | 395641 | 248858189 | 25.079 | 8.568 |
| 630 | 1979.20 | 311725 | 396900 | 250047000 | 25.099 | 8.573 |
| 631 | 1982.34 | 312715 | 398161 | 251239591 | 25.119 | 8.577 |
| 632 | 1985.49 | 313707 | 399424 | 252435968 | 25.139 | 8.582 |
| 633 | 1988.63 | 314701 | 400689 | 253636137 | 25.159 | 8.586 |
| 634 | 1991.77 | 315696 | 401956 | 254840104 | 25.179 | 8.591 |
| 635 | 1994.91 | 316692 | 403225 | 256047875 | 25.199 | 8.595 |
| 636 | 1998.05 | 317691 | 404496 | 257259456 | 25.219 | 8.599 |
| 637 | 2001.19 | 318690 | 405769 | 258474853 | 25.239 | 8.604 |
| 638 | 2004.34 | 319692 | 407044 | 259694072 | 25.259 | 8.609 |
| 639 | 2007.48 | 320695 | 408321 | 260917119 | 25.278 | 8.613 |
| 640 | 2010.62 | 321699 | 409600 | 262144000 | 25.298 | 8.618 |

| Nombres. | Circonférence. | Surface. | Carré. | Cube. | Racine carrée. | Racine cubique. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 641 | 2013.76 | 322705 | 410881 | 263374721 | 25.318 | 8.622 |
| 642 | 2016.90 | 323715 | 412164 | 264609288 | 25.338 | 8.627 |
| 643 | 2020.04 | 324722 | 413449 | 265847707 | 25.357 | 8.631 |
| 644 | 2023.19 | 325733 | 414736 | 267089984 | 25.377 | 8.636 |
| 645 | 2026.33 | 326746 | 416025 | 268336125 | 25.397 | 8.640 |
| 646 | 2029.47 | 327759 | 417316 | 269586136 | 25.416 | 8.644 |
| 647 | 2032.61 | 328775 | 418609 | 270840023 | 25.436 | 8.649 |
| 648 | 2035.76 | 329792 | 419904 | 272097792 | 25.456 | 8.653 |
| 649 | 2038.89 | 330811 | 421201 | 273359449 | 25.475 | 8.658 |
| 650 | 2042.04 | 331831 | 422500 | 274625000 | 25.495 | 8.662 |
| 651 | 2045.18 | 332853 | 423801 | 275894451 | 25.515 | 8.667 |
| 652 | 2048.32 | 333876 | 425104 | 277167808 | 25.534 | 8.671 |
| 653 | 2051.46 | 334901 | 426409 | 278445077 | 25.554 | 8.676 |
| 654 | 2054.60 | 335928 | 427716 | 279726264 | 25.573 | 8.680 |
| 655 | 2057.74 | 336956 | 429025 | 281011375 | 25.593 | 8.684 |
| 656 | 2060.88 | 337985 | 430336 | 282300416 | 25.612 | 8.689 |
| 657 | 2064.03 | 339017 | 431649 | 283593393 | 25.632 | 8.693 |
| 658 | 2067.17 | 340049 | 432964 | 284890312 | 25.651 | 8.698 |
| 659 | 2070.31 | 341084 | 434281 | 286191179 | 25.671 | 8.702 |
| 660 | 2073.45 | 342120 | 435600 | 287496000 | 25.690 | 8.706 |
| 661 | 2076.59 | 343157 | 436921 | 288804781 | 25.710 | 8.711 |
| 662 | 2079.73 | 344196 | 438244 | 290117528 | 25.729 | 8.715 |
| 663 | 2082.88 | 345237 | 439569 | 291434247 | 25.749 | 8.719 |
| 664 | 2086.02 | 346279 | 440896 | 292754944 | 25.768 | 8.724 |
| 665 | 2089.16 | 347323 | 442225 | 294079625 | 25.787 | 8.728 |
| 666 | 2092.30 | 348368 | 443556 | 295408296 | 25.807 | 8.733 |
| 667 | 2095.44 | 349416 | 444889 | 296740963 | 25.826 | 8.737 |
| 668 | 2098.58 | 350464 | 446224 | 298077632 | 25.846 | 8.742 |
| 669 | 2101.73 | 351514 | 447561 | 299418309 | 25.865 | 8.746 |
| 670 | 2104.87 | 352566 | 448900 | 300763000 | 25.884 | 8.750 |
| 671 | 2108.01 | 353619 | 450241 | 302111711 | 25.904 | 8.755 |
| 672 | 2111.15 | 354674 | 451584 | 303464448 | 25.923 | 8.759 |
| 673 | 2114.29 | 355730 | 452929 | 304821217 | 25.942 | 8.763 |
| 674 | 2117.43 | 356788 | 454276 | 306182024 | 25.961 | 8.768 |
| 675 | 2120.58 | 357847 | 455625 | 307546875 | 25.981 | 8.772 |
| 676 | 2123.72 | 358908 | 456976 | 308915776 | 26.000 | 8.776 |
| 677 | 2126.86 | 359971 | 458329 | 310288733 | 26.019 | 8.781 |
| 678 | 2130.00 | 361035 | 459684 | 311665752 | 26.038 | 8.785 |
| 679 | 2133.14 | 362101 | 461041 | 313046839 | 26.058 | 8.789 |
| 680 | 2136.28 | 363168 | 462400 | 314432000 | 26.077 | 8.794 |
| 681 | 2139.42 | 364237 | 463761 | 315821241 | 26.096 | 8.798 |
| 682 | 2142.57 | 365308 | 465124 | 317214568 | 26.115 | 8.802 |
| 683 | 2145.71 | 366380 | 466489 | 318611987 | 26.134 | 8.807 |
| 684 | 2148.85 | 367454 | 467856 | 320013504 | 26.153 | 8.811 |
| 685 | 2151.99 | 368529 | 469225 | 321419125 | 26.172 | 8.815 |
| 686 | 2155.13 | 369605 | 470596 | 322828856 | 26.192 | 8.819 |
| 687 | 2158.27 | 370684 | 471969 | 324242703 | 26.211 | 8.824 |
| 688 | 2161.42 | 371764 | 473344 | 325660672 | 26.229 | 8.828 |
| 689 | 2164.56 | 372845 | 474721 | 327082769 | 26.249 | 8.832 |
| 690 | 2167.70 | 373928 | 476100 | 328509000 | 26.268 | 8.836 |
| 691 | 2170.84 | 375013 | 477481 | 329939371 | 26.287 | 8.841 |
| 692 | 2173.98 | 376099 | 478864 | 331373888 | 26.306 | 8.845 |
| 693 | 2177.12 | 377187 | 480249 | 332812557 | 26.325 | 8.849 |
| 694 | 2180.27 | 378276 | 481636 | 334255384 | 26.344 | 8.853 |
| 695 | 2183.41 | 379367 | 483025 | 335702375 | 26.363 | 8.858 |
| 696 | 2186.55 | 380460 | 484416 | 337153536 | 26.382 | 8.862 |
| 697 | 2189.69 | 381554 | 485809 | 338608873 | 26.401 | 8.866 |
| 698 | 2192.83 | 382650 | 487204 | 340068392 | 26.419 | 8.870 |
| 699 | 2195.97 | 383747 | 488601 | 341532099 | 26.439 | 8.875 |
| 700 | 2199.12 | 384846 | 490000 | 343000000 | 26.457 | 8.879 |
| 701 | 2202.26 | 385945 | 491401 | 344472101 | 26.476 | 8.883 |
| 702 | 2205.40 | 387048 | 492804 | 345948408 | 26.495 | 8.887 |
| 703 | 2208.54 | 388151 | 494209 | 347428927 | 26.514 | 8.892 |
| 704 | 2211.68 | 389256 | 495616 | 348913664 | 26.533 | 8.896 |
| 705 | 2214.82 | 390363 | 497025 | 350402625 | 26.552 | 8.900 |

| Nombres | Circonférence. | Surface. | Carré. | Cube. | Racine carrée. | Racine cubique. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 706 | 2217.96 | 391471 | 498436 | 351895816 | 26.571 | 8.904 |
| 707 | 2221.11 | 392581 | 499849 | 353393243 | 26.589 | 8.908 |
| 708 | 2224.25 | 393692 | 501264 | 354894912 | 26.608 | 8.913 |
| 709 | 2227.39 | 394805 | 502681 | 356400829 | 26.627 | 8.917 |
| 710 | 2230.53 | 395920 | 504100 | 357911000 | 26.645 | 8.921 |
| 711 | 2233.67 | 397036 | 505521 | 359425431 | 26.664 | 8.925 |
| 712 | 2236.81 | 398151 | 506944 | 360944128 | 26.683 | 8.929 |
| 713 | 2239.96 | 399273 | 508369 | 362467097 | 26.702 | 8.934 |
| 714 | 2243.10 | 400395 | 509796 | 363994344 | 26.721 | 8.938 |
| 715 | 2246.24 | 401516 | 511225 | 365525875 | 26.739 | 8.942 |
| 716 | 2249.38 | 402640 | 512656 | 367061696 | 26.758 | 8.946 |
| 717 | 2252.52 | 403765 | 514089 | 368601815 | 26.777 | 8.950 |
| 718 | 2255.66 | 404892 | 515524 | 370146232 | 26.795 | 8.954 |
| 719 | 2258.81 | 406021 | 516961 | 371694959 | 26.814 | 8.959 |
| 720 | 2261.95 | 407151 | 518400 | 373248000 | 26.833 | 8.963 |
| 721 | 2265.09 | 408283 | 519841 | 374805361 | 26.851 | 8.967 |
| 722 | 2268.23 | 409416 | 521284 | 376367048 | 26.870 | 8.971 |
| 723 | 2271.37 | 410551 | 522729 | 377933067 | 26.889 | 8.975 |
| 724 | 2274.51 | 411687 | 524176 | 379503424 | 26.907 | 8.979 |
| 725 | 2277.66 | 412825 | 525625 | 381078125 | 26.926 | 8.983 |
| 726 | 2280.80 | 413965 | 527076 | 382657176 | 26.944 | 8.988 |
| 727 | 2283.94 | 415106 | 528529 | 384240583 | 26.963 | 8.992 |
| 728 | 2287.08 | 416249 | 529984 | 385828352 | 26.981 | 8.996 |
| 729 | 2290.22 | 417393 | 531441 | 387420489 | 27.000 | 9.000 |
| 730 | 2293.36 | 418539 | 532900 | 389017000 | 27.018 | 9.004 |
| 731 | 2296.50 | 419687 | 534361 | 390617891 | 27.037 | 9.008 |
| 732 | 2299.65 | 420836 | 535824 | 392223168 | 27.055 | 9.012 |
| 733 | 2302.79 | 421986 | 537289 | 393832837 | 27.074 | 9.016 |
| 734 | 2305.93 | 423138 | 538756 | 395446904 | 27.092 | 9.020 |
| 735 | 2309.07 | 424292 | 540225 | 397065375 | 27.111 | 9.025 |
| 736 | 2312.21 | 425442 | 541696 | 398688256 | 27.129 | 9.029 |
| 737 | 2315.35 | 426604 | 543169 | 400315553 | 27.148 | 9.033 |
| 738 | 2318.50 | 427763 | 544644 | 401947272 | 27.166 | 9.037 |
| 739 | 2321.64 | 428923 | 546121 | 403583419 | 27.184 | 9.041 |
| 740 | 2324.78 | 430085 | 547600 | 405224000 | 27.203 | 9.045 |
| 741 | 2327.92 | 431248 | 549081 | 406869021 | 27.221 | 9.049 |
| 742 | 2331.06 | 432412 | 550564 | 408518488 | 27.239 | 9.053 |
| 743 | 2334.20 | 433579 | 552049 | 410172407 | 27.258 | 9.057 |
| 744 | 2337.35 | 434747 | 553536 | 411830784 | 27.276 | 9.061 |
| 745 | 2340.49 | 435916 | 555025 | 413493625 | 27.295 | 9.065 |
| 746 | 2343.63 | 437087 | 556516 | 415160936 | 27.313 | 9.069 |
| 747 | 2346.77 | 438260 | 558009 | 416832723 | 27.331 | 9.073 |
| 748 | 2349.91 | 439434 | 559504 | 418508992 | 27.349 | 9.077 |
| 749 | 2353.05 | 440610 | 561001 | 420189749 | 27.368 | 9.081 |
| 750 | 2356.20 | 441787 | 562500 | 421875000 | 27.386 | 9.086 |
| 751 | 2359.34 | 442966 | 564001 | 423564751 | 27.404 | 9.089 |
| 752 | 2362.48 | 444146 | 565504 | 425259008 | 27.423 | 9.094 |
| 753 | 2365.62 | 445328 | 567009 | 426957777 | 27.441 | 9.098 |
| 754 | 2368.76 | 446512 | 568516 | 428661064 | 27.459 | 9.102 |
| 755 | 2371.90 | 447697 | 570025 | 430368875 | 27.477 | 9.106 |
| 756 | 2375.04 | 448884 | 571536 | 432081216 | 27.495 | 9.109 |
| 757 | 2378.19 | 450072 | 573049 | 433798093 | 27.514 | 9.114 |
| 758 | 2381.33 | 451262 | 574564 | 435519512 | 27.532 | 9.118 |
| 759 | 2384.47 | 452454 | 576081 | 437245479 | 27.549 | 9.122 |
| 760 | 2387.61 | 453647 | 577600 | 438976000 | 27.568 | 9.126 |
| 761 | 2390.75 | 454841 | 579121 | 440711081 | 27.586 | 9.129 |
| 762 | 2393.89 | 456037 | 580644 | 442450728 | 27.604 | 9.134 |
| 763 | 2397.04 | 457235 | 582169 | 444194947 | 27.622 | 9.138 |
| 764 | 2400.18 | 458435 | 583696 | 445943744 | 27.640 | 9.142 |
| 765 | 2403.32 | 459635 | 585225 | 447697125 | 27.659 | 9.146 |
| 766 | 2406.46 | 460838 | 586756 | 449455096 | 27.677 | 9.149 |
| 767 | 2409.60 | 462042 | 588289 | 451217663 | 27.695 | 9.154 |
| 768 | 2412.74 | 463247 | 589824 | 452984832 | 27.713 | 9.158 |
| 769 | 2415.88 | 464454 | 591361 | 454756609 | 27.731 | 9.162 |
| 770 | 2419.03 | 465665 | 592900 | 456533000 | 27.749 | 9.166 |

| Nombres. | Circonférence. | Surface. | Carré. | Cube. | Racine carrée. | Racine cubique. |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 771 | 2422.17 | 466875 | 594441 | 458514011 | 27.767 | 9.170 |
| 772 | 2423.51 | 468085 | 595984 | 460099648 | 27.785 | 9.174 |
| 773 | 2428.45 | 469299 | 597529 | 461889917 | 27.803 | 9.178 |
| 774 | 2431.59 | 470514 | 599076 | 463684824 | 27.821 | 9.182 |
| 775 | 2434.74 | 471730 | 600625 | 465484375 | 27.839 | 9.185 |
| 776 | 2437.88 | 472949 | 602176 | 467288576 | 27.857 | 9.189 |
| 777 | 2441.02 | 474168 | 603729 | 469097433 | 27.875 | 9.193 |
| 778 | 2444.16 | 475390 | 605284 | 470910952 | 27.893 | 9.197 |
| 779 | 2447.30 | 476612 | 606841 | 472729139 | 27.911 | 9.201 |
| 780 | 2450.44 | 477837 | 608400 | 474552000 | 27.928 | 9.205 |
| 781 | 2453.58 | 479065 | 609961 | 476379541 | 27.946 | 9.209 |
| 782 | 2456.75 | 480290 | 611524 | 478211768 | 27.964 | 9.213 |
| 783 | 2459.87 | 481520 | 613089 | 480048687 | 27.982 | 9.217 |
| 784 | 2463.01 | 482750 | 614656 | 481890304 | 28.000 | 9.221 |
| 785 | 2466.15 | 483983 | 616225 | 483736625 | 28.018 | 9.225 |
| 786 | 2469.29 | 485216 | 617796 | 485587656 | 28.036 | 9.229 |
| 787 | 2472.43 | 486452 | 619369 | 487443403 | 28.054 | 9.233 |
| 788 | 2475.58 | 487689 | 620944 | 489303872 | 28.071 | 9.237 |
| 789 | 2478.72 | 488927 | 622521 | 491169069 | 28.089 | 9.240 |
| 790 | 2481.86 | 490168 | 624100 | 493039000 | 28.107 | 9.244 |
| 791 | 2485.00 | 491409 | 625681 | 494913671 | 28.125 | 9.248 |
| 792 | 2488.14 | 492653 | 627264 | 496793088 | 28.142 | 9.252 |
| 793 | 2491.28 | 493898 | 628849 | 498677257 | 28.160 | 9.256 |
| 794 | 2494.43 | 495144 | 630436 | 500566184 | 28.178 | 9.260 |
| 795 | 2497.57 | 496392 | 632025 | 502459875 | 28.196 | 9.264 |
| 796 | 2500.71 | 497642 | 633616 | 504358336 | 28.215 | 9.268 |
| 797 | 2503.85 | 498893 | 635209 | 506261573 | 28.231 | 9.272 |
| 798 | 2506.99 | 500145 | 636804 | 508169592 | 28.249 | 9.275 |
| 799 | 2510.13 | 501400 | 638401 | 510082399 | 28.267 | 9.279 |
| 800 | 2513.28 | 502656 | 640000 | 512000000 | 28.284 | 9.283 |
| 801 | 2516.42 | 503913 | 641601 | 513922401 | 28.302 | 9.287 |
| 802 | 2519.56 | 505172 | 643204 | 515849608 | 28.320 | 9.291 |
| 803 | 2522.70 | 506432 | 644809 | 517781627 | 28.337 | 9.295 |
| 804 | 2525.84 | 507695 | 646416 | 519718464 | 28.355 | 9.299 |
| 805 | 2528.98 | 508958 | 648025 | 521660125 | 28.373 | 9.302 |
| 806 | 2532.12 | 510224 | 649636 | 523606616 | 28.390 | 9.306 |
| 807 | 2535.27 | 511490 | 651249 | 525557943 | 28.408 | 9.310 |
| 808 | 2538.41 | 512759 | 652864 | 527514112 | 28.425 | 9.314 |
| 809 | 2541.55 | 514029 | 654481 | 529475129 | 28.443 | 9.318 |
| 810 | 2544.69 | 515300 | 656100 | 531441000 | 28.460 | 9.322 |
| 811 | 2547.83 | 516574 | 657721 | 533411731 | 28.478 | 9.326 |
| 812 | 2550.97 | 517848 | 659344 | 535387328 | 28.496 | 9.329 |
| 813 | 2554.12 | 519125 | 660969 | 537367797 | 28.513 | 9.333 |
| 814 | 2557.26 | 520402 | 662596 | 539353144 | 28.531 | 9.337 |
| 815 | 2560.40 | 521682 | 664225 | 541343375 | 28.548 | 9.341 |
| 816 | 2563.54 | 522963 | 665856 | 543338496 | 28.566 | 9.345 |
| 817 | 2566.68 | 524245 | 667489 | 545338513 | 28.583 | 9.348 |
| 818 | 2569.82 | 525529 | 669124 | 547343432 | 28.601 | 9.352 |
| 819 | 2572.97 | 526815 | 670761 | 549353259 | 28.618 | 9.356 |
| 820 | 2576.11 | 528102 | 672400 | 551368000 | 28.636 | 9.360 |
| 821 | 2579.25 | 529391 | 674041 | 553387661 | 28.653 | 9.364 |
| 822 | 2582.39 | 530682 | 675684 | 555412248 | 28.671 | 9.368 |
| 823 | 2585.53 | 531974 | 677329 | 557441767 | 28.688 | 9.371 |
| 824 | 2588.67 | 533267 | 678976 | 559476224 | 28.705 | 9.375 |
| 825 | 2591.82 | 534562 | 680625 | 561515625 | 28.723 | 9.379 |
| 826 | 2594.96 | 535859 | 682276 | 563559976 | 28.740 | 9.383 |
| 827 | 2598.10 | 537158 | 683929 | 565609283 | 28.758 | 9.386 |
| 828 | 2601.24 | 538457 | 685584 | 567663552 | 28.775 | 9.390 |
| 829 | 2604.38 | 539759 | 687241 | 569722789 | 28.792 | 9.394 |
| 830 | 2607.52 | 541062 | 688900 | 571787000 | 28.810 | 9.398 |
| 831 | 2610.66 | 542366 | 690561 | 573856191 | 28.827 | 9.402 |
| 832 | 2613.81 | 543672 | 692224 | 575930368 | 28.844 | 9.405 |
| 833 | 2616.95 | 544980 | 693889 | 578009537 | 28.862 | 9.409 |
| 834 | 2620.09 | 546289 | 695556 | 580093704 | 28.879 | 9.413 |
| 835 | 2623.23 | 547600 | 697225 | 582182875 | 28.896 | 9.417 |
| 836 | 2626.37 | 548912 | 698896 | 584277056 | 28.914 | 9.420 |
| 837 | 2629.51 | 550226 | 700569 | 586376253 | 28.931 | 9.424 |
| 838 | 2632.64 | 551542 | 702244 | 588480472 | 28.948 | 9.428 |
| 839 | 2635.80 | 552859 | 703921 | 590589719 | 28.965 | 9.432 |
| 840 | 2638.94 | 554178 | 705600 | 592704000 | 28.983 | 9.435 |
| 841 | 2642.08 | 555498 | 707281 | 594823321 | 29.000 | 9.439 |
| 842 | 2645.22 | 556820 | 708964 | 596947688 | 29.017 | 9.443 |
| 843 | 2648.36 | 558145 | 710649 | 599077107 | 29.034 | 9.447 |
| 844 | 2651.51 | 559468 | 712336 | 601211584 | 29.052 | 9.450 |
| 845 | 2654.65 | 560795 | 714025 | 603351125 | 29.069 | 9.454 |
| 846 | 2657.79 | 562125 | 715716 | 605495736 | 29.086 | 9.458 |
| 847 | 2660.93 | 563452 | 717409 | 607645423 | 29.103 | 9.462 |
| 848 | 2664.07 | 564784 | 719104 | 609800192 | 29.120 | 9.465 |
| 849 | 2667.21 | 566117 | 720801 | 611960049 | 29.138 | 9.469 |
| 850 | 2670.36 | 567451 | 722500 | 614125000 | 29.155 | 9.473 |
| 851 | 2673.50 | 568787 | 724201 | 616295051 | 29.172 | 9.476 |
| 852 | 2676.64 | 570125 | 725904 | 618470208 | 29.189 | 9.480 |
| 853 | 2679.78 | 571464 | 727609 | 620650477 | 29.206 | 9.484 |
| 854 | 2682.92 | 572804 | 729316 | 622835864 | 29.223 | 9.488 |
| 855 | 2686.06 | 574147 | 731025 | 625026375 | 29.240 | 9.491 |
| 856 | 2689.20 | 575490 | 732736 | 627222016 | 29.257 | 9.495 |
| 857 | 2692.35 | 576836 | 734449 | 629422793 | 29.275 | 9.499 |
| 858 | 2695.49 | 578185 | 736164 | 631628712 | 29.292 | 9.502 |
| 859 | 2698.63 | 579534 | 737881 | 633839779 | 29.309 | 9.506 |
| 860 | 2701.77 | 580881 | 739600 | 936056000 | 29.326 | 9.510 |
| 861 | 2704.91 | 582235 | 741321 | 638277381 | 29.343 | 9.513 |
| 862 | 2708.05 | 583586 | 745044 | 640503928 | 29.360 | 9.517 |
| 863 | 2711.20 | 584941 | 744769 | 642735647 | 29.377 | 9.521 |
| 864 | 2714.34 | 586297 | 746496 | 644972544 | 29.394 | 9.524 |
| 865 | 2717.48 | 587655 | 748225 | 647214625 | 29.411 | 9.528 |
| 866 | 2720.62 | 589015 | 749956 | 649461896 | 29.428 | 9.532 |
| 867 | 2723.76 | 590376 | 751689 | 651714363 | 29.445 | 9.535 |
| 868 | 2726.90 | 591739 | 753424 | 653972032 | 29.462 | 9.539 |
| 869 | 2730.05 | 593103 | 755161 | 656234909 | 29.479 | 9.543 |
| 870 | 2733.19 | 594469 | 756900 | 658503000 | 29.496 | 9.546 |
| 871 | 2736.33 | 595836 | 758641 | 660776311 | 29.513 | 9.550 |
| 872 | 2739.47 | 597205 | 760384 | 663054848 | 29.550 | 9.554 |
| 873 | 2742.61 | 598576 | 762129 | 665338617 | 29.547 | 9.557 |
| 874 | 2745.75 | 599948 | 763876 | 667627624 | 29.563 | 9.561 |
| 875 | 2748.90 | 601321 | 765625 | 669921875 | 29.580 | 9.565 |
| 876 | 2752.04 | 602697 | 767376 | 672221376 | 29.597 | 9.568 |
| 877 | 2755.18 | 604075 | 769129 | 674526133 | 29.614 | 9.572 |
| 878 | 2758.32 | 605451 | 770884 | 676836152 | 29.631 | 9.576 |
| 879 | 2761.46 | 606832 | 772641 | 679151439 | 29.648 | 9.579 |
| 880 | 2764.60 | 608213 | 774400 | 681472000 | 29.665 | 9.583 |
| 881 | 2767.74 | 609596 | 776161 | 683797841 | 29.682 | 9.586 |
| 882 | 2770.89 | 610981 | 777924 | 686128968 | 29.698 | 9.590 |
| 883 | 2774.03 | 612367 | 779689 | 688465387 | 29.715 | 9.594 |
| 884 | 2777.17 | 613755 | 781456 | 690807104 | 29.732 | 9.597 |
| 885 | 2780.31 | 615144 | 783225 | 693154125 | 29.749 | 9.601 |
| 886 | 2783.45 | 616535 | 784996 | 695506456 | 29.766 | 9.605 |
| 887 | 2786.59 | 617928 | 786769 | 697864103 | 29.783 | 9.608 |
| 888 | 2789.73 | 619322 | 788544 | 700227072 | 29.799 | 9.612 |
| 889 | 2792.88 | 620718 | 790321 | 702595369 | 29.816 | 9.615 |
| 890 | 2796.02 | 622115 | 792100 | 704969000 | 29.833 | 9.619 |
| 891 | 2799.16 | 623514 | 793881 | 707347971 | 29.850 | 9.623 |
| 892 | 2802.30 | 624914 | 795664 | 709732288 | 29.866 | 9.626 |
| 893 | 2805.44 | 626316 | 797449 | 712121957 | 29.883 | 9.630 |
| 894 | 2808.59 | 627719 | 799236 | 714516984 | 29.900 | 9.633 |
| 895 | 2811.73 | 629124 | 801025 | 716917375 | 29.917 | 9.637 |
| 896 | 2814.87 | 630531 | 802816 | 719323136 | 29.933 | 9.641 |
| 897 | 2818.01 | 631939 | 804609 | 721734273 | 29.950 | 9.644 |
| 898 | 2821.15 | 633349 | 806404 | 724150792 | 29.967 | 9.648 |
| 899 | 2824.29 | 634760 | 808201 | 726572699 | 29.983 | 9.651 |
| 900 | 2827.44 | 636174 | 810000 | 729000000 | 30.000 | 9.655 |

| Nombres. | Circonférence. | Surface. | Carré. | Cube. | Racine carrée. | Racine cubique. | Nombres. | Circonférence. | Surface. | Carré. | Cube. | Racine carrée. | Racine cubique. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 901 | 2830.58 | 637588 | 811801 | 731432701 | 30.017 | 9.658 | 951 | 2987.66 | 710316 | 904401 | 860085351 | 30.838 | 9.854 |
| 902 | 2833.72 | 639004 | 813604 | 733870808 | 30.033 | 9.662 | 952 | 2990.80 | 711811 | 906304 | 862801408 | 30.854 | 9.857 |
| 903 | 2836.86 | 640422 | 815409 | 736314327 | 30.050 | 9.666 | 953 | 2993.94 | 713307 | 908209 | 865525177 | 30.871 | 9.841 |
| 904 | 2840.00 | 641841 | 817216 | 738763264 | 30.067 | 9.669 | 954 | 2997.08 | 714805 | 910116 | 868256664 | 30.887 | 9.844 |
| 905 | 2843.14 | 643262 | 819025 | 741217625 | 30.083 | 9.673 | 955 | 3000.22 | 716304 | 912025 | 870983875 | 30.903 | 9.848 |
| 906 | 2846.28 | 644684 | 820836 | 743677416 | 30.100 | 9.676 | 956 | 3003.36 | 717805 | 913936 | 873722816 | 30.919 | 9.851 |
| 907 | 2849.43 | 646108 | 822649 | 746142643 | 30.116 | 9.680 | 957 | 3006.51 | 719307 | 915849 | 876467493 | 30.935 | 9.855 |
| 908 | 2852.57 | 647534 | 824464 | 748613312 | 30.133 | 9.683 | 958 | 3009.65 | 720811 | 917764 | 879217912 | 30.952 | 9.858 |
| 909 | 2855.71 | 648961 | 826281 | 751089429 | 30.150 | 9.687 | 959 | 3012.79 | 722317 | 919681 | 881974079 | 30.968 | 9.861 |
| 910 | 2858.85 | 650389 | 828100 | 753571000 | 30.166 | 9.691 | 960 | 3015.93 | 723824 | 921600 | 884736000 | 30.984 | 9.865 |
| 911 | 2861.99 | 651819 | 829921 | 756058031 | 30.183 | 9.694 | 961 | 3019.07 | 725333 | 923521 | 887503681 | 31.000 | 9.868 |
| 912 | 2865.13 | 653251 | 831744 | 758550528 | 30.199 | 9.698 | 962 | 3022.21 | 726845 | 925444 | 890277128 | 31.016 | 9.872 |
| 913 | 2868.27 | 654684 | 833569 | 761048497 | 30.216 | 9.701 | 963 | 3025.36 | 728355 | 927369 | 893056347 | 31.032 | 9.875 |
| 914 | 2871.42 | 656120 | 835396 | 763551944 | 30.232 | 9.705 | 964 | 3028.50 | 729869 | 929296 | 895841344 | 31.048 | 9.879 |
| 915 | 2874.56 | 657556 | 837225 | 766060875 | 30.249 | 9.708 | 965 | 3031.64 | 731384 | 931225 | 898632125 | 31.064 | 9.882 |
| 916 | 2877.70 | 658994 | 839056 | 768575296 | 30.265 | 9.712 | 966 | 3034.78 | 732900 | 933156 | 901428696 | 31.081 | 9.885 |
| 917 | 2880.84 | 660432 | 840889 | 771095213 | 30.282 | 9.715 | 967 | 3037.92 | 734418 | 935089 | 904231065 | 31.097 | 9.889 |
| 918 | 2883.98 | 661875 | 842724 | 773620632 | 30.299 | 9.719 | 968 | 3041.06 | 735938 | 937024 | 907039232 | 31.113 | 9.892 |
| 919 | 2887.13 | 663318 | 844561 | 776151559 | 30.315 | 9.722 | 969 | 3044.21 | 737459 | 938961 | 909853209 | 31.129 | 9.896 |
| 920 | 2890.27 | 664762 | 846400 | 778688000 | 30.332 | 9.726 | 970 | 3047.35 | 738982 | 940900 | 912673000 | 31.145 | 9.899 |
| 921 | 2893.41 | 666208 | 848241 | 781229961 | 30.348 | 9.729 | 971 | 3050.49 | 740507 | 942841 | 915498611 | 31.161 | 9.902 |
| 922 | 2896.55 | 667655 | 850084 | 783777448 | 30.364 | 9.733 | 972 | 3053.63 | 742033 | 944784 | 918330048 | 31.177 | 9.906 |
| 923 | 2899.69 | 669104 | 851929 | 786330467 | 30.381 | 9.736 | 973 | 3056.77 | 743560 | 946729 | 921167317 | 31.193 | 9.909 |
| 924 | 2902.83 | 670555 | 853776 | 788889024 | 30.397 | 9.740 | 974 | 3059.91 | 745090 | 948676 | 924010424 | 31.209 | 9.913 |
| 925 | 2905.98 | 672007 | 855625 | 791453125 | 30.414 | 9.743 | 975 | 3063.06 | 746620 | 950625 | 926859375 | 31.225 | 9.916 |
| 926 | 2909.12 | 673461 | 857476 | 794022776 | 30.430 | 9.747 | 976 | 3066.20 | 748153 | 952576 | 929714176 | 31.241 | 9.919 |
| 927 | 2912.26 | 674916 | 859329 | 796597083 | 30 447 | 9.750 | 977 | 3069.34 | 749687 | 954529 | 932574833 | 31.257 | 9.923 |
| 928 | 2915.40 | 676373 | 861184 | 799178752 | 30.463 | 9.754 | 978 | 3072.48 | 751222 | 956484 | 935441352 | 31.273 | 9.926 |
| 929 | 2918.54 | 677832 | 863041 | 801765089 | 30.480 | 9.758 | 979 | 3075.62 | 752759 | 958441 | 938313739 | 31.289 | 9.930 |
| 930 | 2921.68 | 679292 | 864900 | 804357000 | 30.496 | 9.761 | 980 | 3078.76 | 754298 | 960400 | 941192000 | 31.305 | 9.933 |
| 931 | 2924.82 | 680754 | 866761 | 806954491 | 30.512 | 9.764 | 981 | 3081.90 | 755838 | 962361 | 944076141 | 31.321 | 9.936 |
| 932 | 2927.97 | 682217 | 868624 | 809557568 | 30.529 | 9.768 | 982 | 3085.05 | 757380 | 964324 | 946966168 | 31.337 | 9.940 |
| 933 | 2931.11 | 683682 | 870489 | 812166237 | 30.545 | 9.771 | 983 | 3088.19 | 758923 | 966289 | 949862087 | 31.353 | 9.943 |
| 934 | 2934.25 | 685148 | 872356 | 814780504 | 30.561 | 9.775 | 984 | 3091.33 | 760468 | 968256 | 952763904 | 31.369 | 9.946 |
| 935 | 2937.39 | 686616 | 874225 | 817400375 | 30.578 | 9.778 | 985 | 3094.47 | 762014 | 970225 | 955671625 | 31.385 | 9.950 |
| 936 | 2940.53 | 688085 | 876096 | 820025856 | 30.594 | 9.783 | 986 | 3097.61 | 763562 | 972196 | 958585256 | 31.401 | 9.953 |
| 937 | 2943.67 | 689556 | 877969 | 822656953 | 30.610 | 9.785 | 987 | 3100.75 | 765111 | 974169 | 961504803 | 31.417 | 9.956 |
| 938 | 2946.82 | 691029 | 879844 | 825293672 | 30.627 | 9.789 | 988 | 3103.89 | 766663 | 976144 | 964430272 | 31.432 | 9.960 |
| 939 | 2949.96 | 692503 | 881721 | 827936019 | 30.643 | 9.792 | 989 | 3107.04 | 768216 | 978121 | 967361669 | 31.448 | 9.963 |
| 940 | 2953.10 | 693979 | 883600 | 830584000 | 30.659 | 9.796 | 990 | 3110.18 | 769770 | 980100 | 970299000 | 31.464 | 9.967 |
| 941 | 2956.24 | 695456 | 885481 | 833237621 | 30.676 | 9.799 | 991 | 3113.32 | 771326 | 982081 | 973242271 | 31.480 | 9.970 |
| 942 | 2959.38 | 696935 | 887364 | 835896888 | 30.692 | 9.803 | 992 | 3116.46 | 772883 | 984064 | 976191488 | 31.496 | 9.973 |
| 943 | 2962.52 | 698416 | 889249 | 838561807 | 30.708 | 9.806 | 993 | 3119.60 | 774442 | 986049 | 979146657 | 31.512 | 9.977 |
| 944 | 2965.67 | 699898 | 891136 | 841232384 | 30.725 | 9.810 | 994 | 3122.75 | 776003 | 988036 | 982107784 | 31.528 | 9.980 |
| 945 | 2968.81 | 701381 | 893025 | 843908625 | 30.741 | 9.813 | 995 | 3125.89 | 777565 | 990025 | 985074875 | 31.544 | 9.983 |
| 946 | 2971.95 | 702867 | 894916 | 846590536 | 30.757 | 9.817 | 996 | 3129.03 | 779129 | 992016 | 988047936 | 31.559 | 9.987 |
| 947 | 2975.09 | 704352 | 896809 | 849278123 | 30.773 | 9.820 | 997 | 3132.17 | 780693 | 994009 | 991026973 | 31.575 | 9.990 |
| 948 | 2978.23 | 705841 | 898704 | 851971392 | 30.790 | 9.824 | 998 | 3135.31 | 782260 | 996004 | 994011992 | 31.591 | 9.993 |
| 949 | 2981.37 | 707332 | 900601 | 854670349 | 30.806 | 9.827 | 999 | 3138.45 | 783829 | 998001 | 997002999 | 31.607 | 9.997 |
| 950 | 2984.52 | 708823 | 902500 | 857375000 | 30.822 | 9.850 | 1000 | 3141.59 | 785399 | 1000000 | 1000000000 | 31.623 | 10.000 |

FIN.

Paris. — Imprimé par E. Thunot et Cᵉ, rue Racine, 26.

# ORDRES D'ARCHITECTURE.

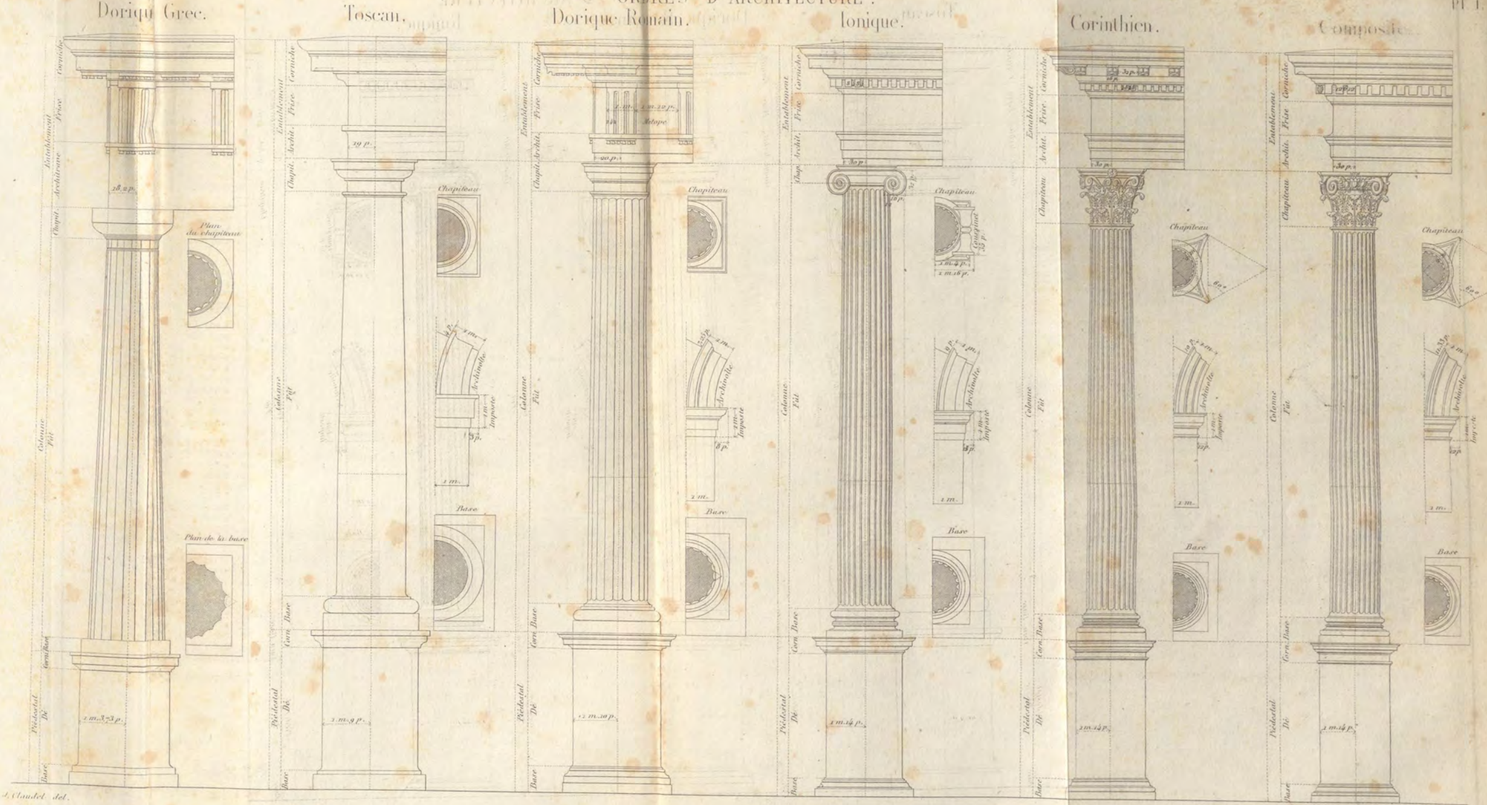


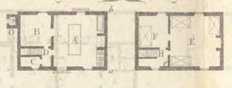
Fig. 1.



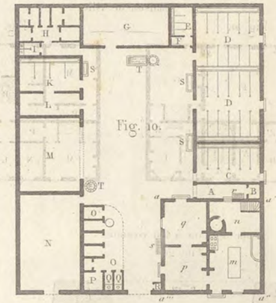
Maison de journalier
à un simple rez-de-chaussée.
Fig. 2.



Maison de journalier
avec un rez-de-chaussée et un étage.
Fig. 3. Fig. 4.



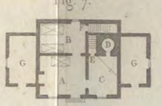
Ferme.



Maison double de journalier
avec un 1er étage et dépendances.
Fig. 5. Fig. 6.



Maison d'éclusier.
Fig. 7.



Habitation d'un petit cultivateur.
Fig. 8.



Petite Ferme.



Fig. 9.

Maison de ville.
Fig. 11. Fig. 12.

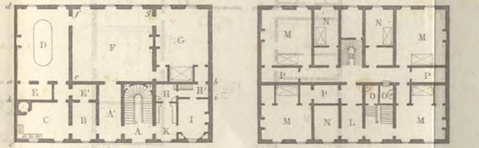
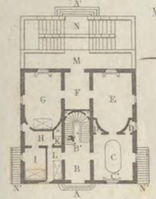


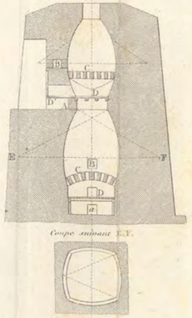
Fig. 13.



Maison de campagne.
Fig. 14.



Four à briques.
Fig. 15.



Four à poterie.
Fig. 16.

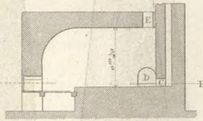
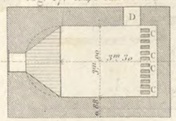
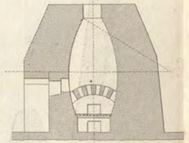


Fig. 17. *Coupe suivant* AB.



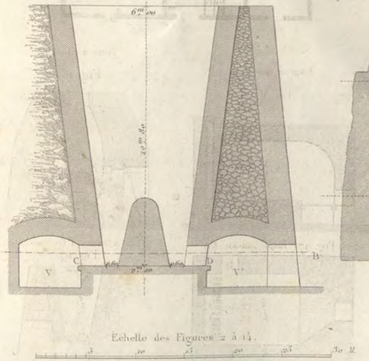
Four à plâtre.
Fig. 18.



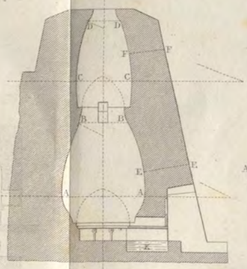
Four à chaux à feu continu.
Fig. 19.



Four à chaux à feu continu.
Fig. 20.



Four à chaux à feu discontinu.
Fig. 21.



Four à Pouzzolane.
Fig. 22.

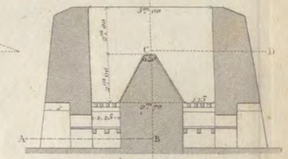
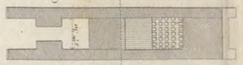


Fig. 23. *Coupe suivant* ABCD



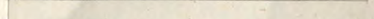
Coupe suivant EF.



Echelle des Figures 2 à 14.



Echelle des Figures 15 à 23.



A. Chaudet del.



Fig. 1.
Machine à fabriquer le Béton.

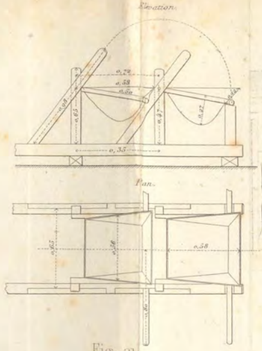



Fig. 2.



Fig. 3.



Fig. 4.



Fig. 5.



Fig. 6.
Pan de Bois

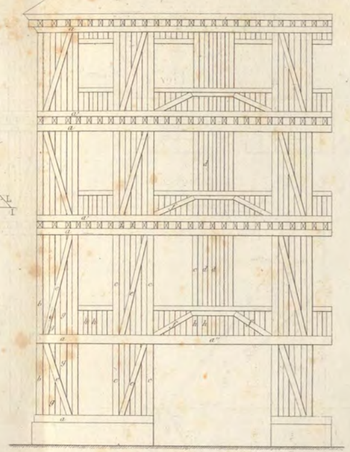


Fig. 7.
Charpente de plancher.

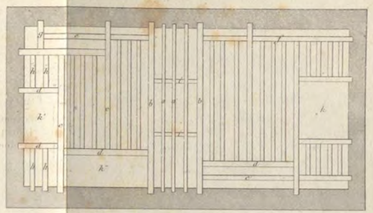


Fig. 8.
Lambourde
Solive



Fig. 15.
Coupe des tuiles-pannes



Fig. 18.



Fig. 19.



Fig. 20.



Fig. 21.

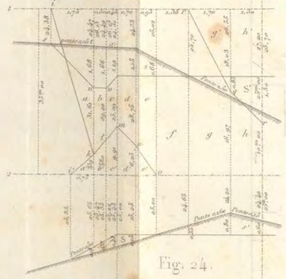


Fig. 22.

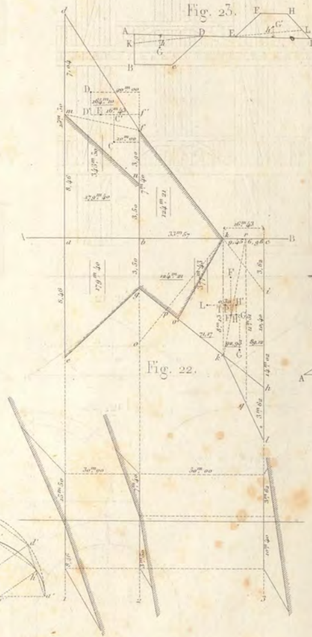


Fig. 23.



Fig. 24.



Fig. 25.
Courbe à trois centres

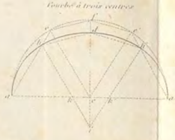


Fig. 26.
Courbe à cinq centres



Fig. 9.

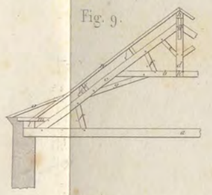


Fig. 10.

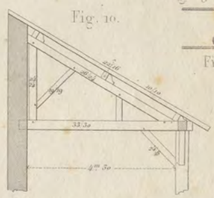


Fig. 11.



Fig. 12.

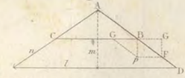


Fig. 27. Courbe à onze centres.

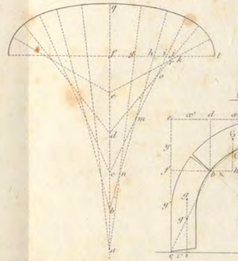


Fig. 29.

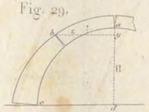


Fig. 28.

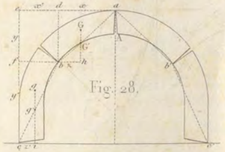


Fig. 13.



Fig. 14.



Fig. 16.



Fig. 17.



Fig. 31.



Fig. 34.

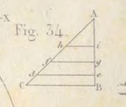


Fig. 33.

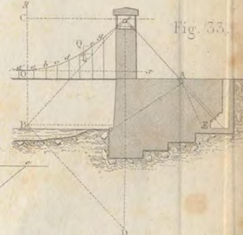
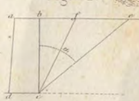


Fig. 30.

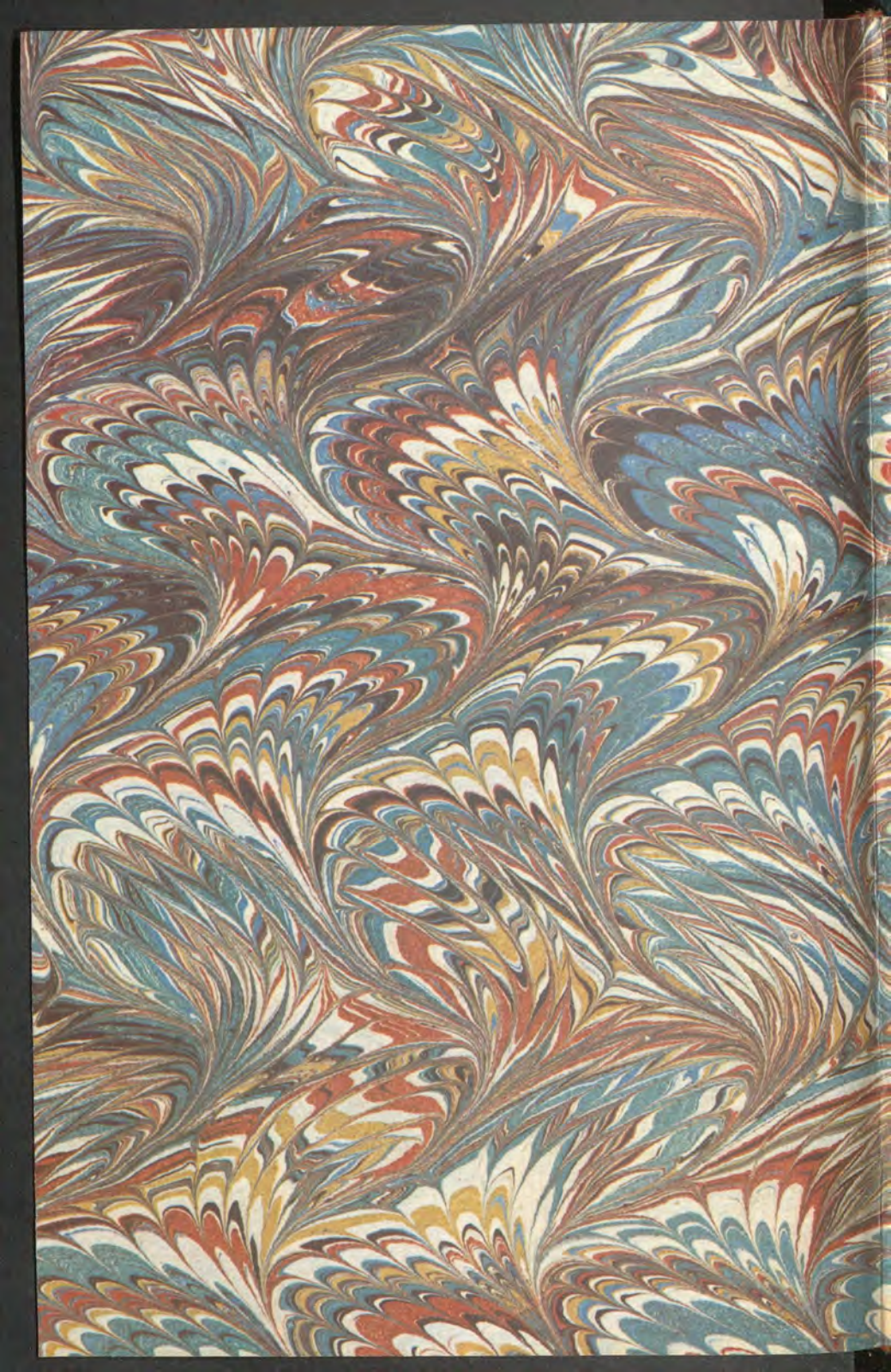


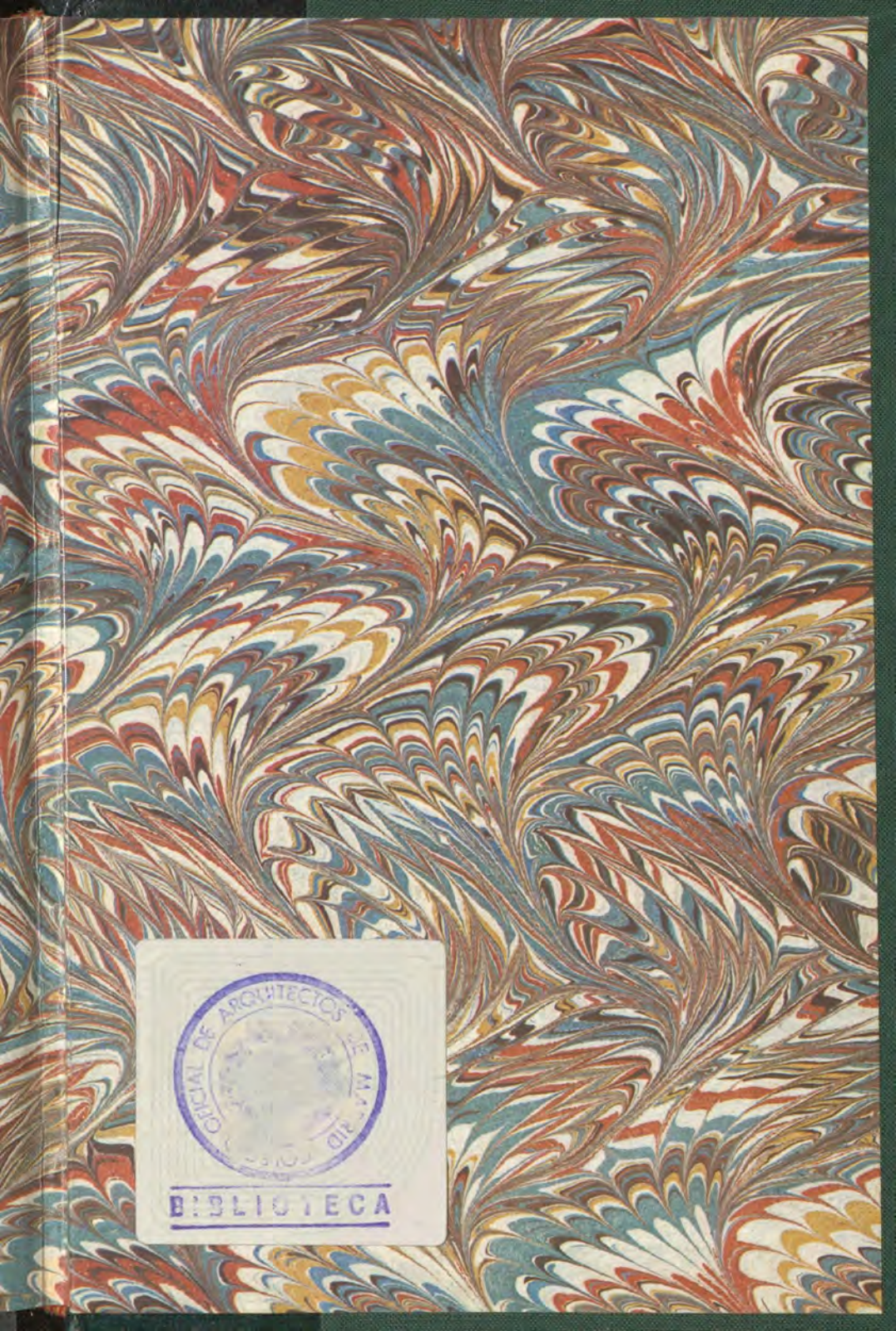
Fig. 32.



M. Chaudet del.

Ribon sculp.




COLEGIO OFICIAL DE ARQUITECTOS DE MADRID
BIBLIOTECA

