

BIBLIOTHÈQUE DE L'ENSEIGNEMENT TECHNIQUE

CYCLE DE L'INGENIEUR

**ÉLÉMENTS
DE
CONSTRUCTION
A L'USAGE DE L'INGÉNIEUR**

PAR

G. LEMASSON

PROFESSEUR DE CONSTRUCTIONS

A L'E. N. I. A. M.

DE LILLE

A.-L. TOURANCHEAU

PROFESSEUR DE CONSTRUCTIONS

A L'E. N. I. A. M. ET A L'E. N. S. E. T.

DE PARIS

TOME IX

**PRODUCTION ET UTILISATION
DE LA VAPEUR**

PARIS

DUNOD

92. RUE BONAPARTE (VI)

TABLE DES MATIÈRES

PRODUCTION ET UTILISATION DE LA VAPEUR

INTRODUCTION

1. Fonction thermique, fonction mécanique des chaudières à vapeur
et des moteurs à vapeur..... VII

PREMIÈRE PARTIE

CHAUDIÈRES A VAPEUR

2. Généralités..... 1
Parties principales d'une chaudière..... 1
3. Les caractéristiques d'une chaudière..... 2
Timbre 2
Température de la vapeur surchauffée..... 3
Puissance de vaporisation..... 3
Surface de chauffe..... 3
Production horaire de vapeur par m² de surface de chauffe : 3
Rendement thermique 3

CHAPITRE I

PRODUCTION DE LA CHALEUR

4. Combustion. Combustibles 5
Pouvoirs calorifiques : P_{cs} , P_{ct} 5
Combustion théorique 5
5. Combustion réelle 6
6. Température des produits de la combustion 7
Température théorique 7
Température réelle 8
7. Houilles..... 8
Caractéristiques 8
8. Application..... 9
9. Combustibles liquides 11
Caractéristiques 11
10. Combustibles gazeux..... 12
Caractéristiques 12

11. Combustibles spéciaux. Combustibles pauvres.....	12
Lignites. Tourbe. Bois. Tannée. Copeaux. Sciure de bois.	
Bagasse. Cosses d'arachides. Balle de riz.....	12
12. Foyers des chaudières à vapeur.....	13
Classification	13
13. Grille fixe à chargement à main. — Description.....	13
Installation générale. — Portes de foyer.....	13
14. Critique de la grille fixe.....	14
Avantages.....	14
Inconvénients.....	14
Remèdes :	
1° Foyer fumivore.....	15
2° Foyer à tirage équilibré	15
15. Calcul de la surface de grille.....	16

CHAPITRE II

PRODUCTION DE LA CHALEUR (suite)

16. Grille mécanique à chaîne. — Description.....	19
Fonctionnement.....	19
Caractéristiques	19
17. Critique. — Détails de construction.....	20
Grille 15, Babcock et Wilcox	22
Grille Harrington.....	22
18. Grille à chargement par-dessous.....	22
Principe. — Fonctionnement.....	22
19. Construction.....	23
Foyer automatique Wanson	23
Foyer Riley.....	23
20. Emploi des combustibles liquides.....	24
Avantages et inconvénients.....	24
Brûleurs pour combustibles liquides.....	24
21. Modes de pulvérisation des combustibles.....	24
Par la vapeur.....	24
Pulvérisation mécanique.....	25
Brûleurs	26
22. Combustibles gazeux. — Brûleur.....	27
23. Emploi du charbon pulvérisé.....	27
Avantages et inconvénients.....	28
24. Préparation du charbon pulvérisé.....	29
Les appareils.....	29
25. Groupes broyeurs.....	30
Broyeur-sécheur à boulets.....	30
Groupe broyeur à impact.....	30
26. Brûleurs pour charbon pulvérisé.....	31
Position des brûleurs.....	31
Brûleur à turbulence.....	33
Brûleur vertical.....	34
27. Chambre de combustion. — Matériaux.....	34
Produits réfractaires : caractéristiques.....	34
Produits courants silico-alumineux.....	34
— alumineux	34
Produits surcomprimés.....	34

28. Murs. — Voûtes.....	35
Voûte plane suspendue.....	35
29. Murs spéciaux pour foyers au charbon pulvérisé.....	36
Murs à écrans d'air = murs accrochés.....	36
Murs à écrans d'eau.....	37
Chambre Bailey.....	39
30. Évacuation des cendres.....	40
Cendres fondues.....	40
Cendres pulvérulentes.....	40

CHAPITRE III

ÉTUDE GÉNÉRALE DE LA CONSTRUCTION D'UNE CHAUDIÈRE CALCULS MÉCANIQUES ET THERMIQUES

31. Calcul d'un corps de chaudière.....	41
Règlementation.....	41
Tôles pour chaudières.....	41
32. Calcul de l'épaisseur des viroles.....	41
Exemple.....	42
Surcharge d'épreuve.....	42
33. Rivures.....	42
Matériaux.....	42
Établissement d'une rivure longitudinale.....	42
Diamètre des rivets.....	42
Différents types de rivures.....	43
Coefficient de rivure.....	45
34. Applications.....	45
35. Établissement d'une rivure transversale.....	47
36. Soudage des corps de chaudières.....	48
Coefficient de soudure.....	48
37. Fonds bombés de corps de chaudière.....	49
Fond à méridienne en anse de panier.....	49
Fond à méridienne elliptique.....	49
Calcul de l'épaisseur.....	49
38. Construction d'un corps de chaudière.....	50
Travail des tôles.....	50
Disposition des joints.....	50
Rivures. — Soudures.....	51
Trous d'homme.....	51
39. Appareils de sécurité des chaudières.....	52
Soupapes de sûreté. — Manomètre. — Indicateurs du niveau de l'eau. — Appareil d'alarme. — Clapets automatiques de retenue de vapeur et d'eau. — Vanne d'arrêt de vapeur.....	52
40. La transmission de chaleur dans les chaudières.....	53
Rayonnement direct.....	53
Température réelle dans le foyer.....	54
41. Chaleur transmise par convection.....	54
42. Calcul des températures de sortie.....	55
43. Température de la paroi.....	56
44. Détermination de α_1 c/m ² h ⁰	56
Cas de l'air. Cas des fumées.....	56

45. Détermination de α_2 c/m²h°
 Eau en ébullition. — Vapeur. — Eau non en ébullition...
 46. Rayonnement gazeux.....
 47. Application.....
 Chaudière semi-tubulaire.....
 48. Bilan thermique.....
 49. Pertes dans les chaudières.....
 Pertes par imbrûlés solides
 Pertes par imbrûlés gazeux.....
 Perte due à l'humidité du combustible et à la combustion
 de H
 Perte par chaleur sensible des fumées sèches.....
 Perte par conduction, rayonnement

CHAPITRE IV

ÉTUDE DES DIFFÉRENTS TYPES DE CHAUDIÈRES

50. Classification des chaudières.....
 51. Chaudières à bouilleurs.....
 Avantages. — Inconvénients. — Caractéristiques.....
 52. Chaudières à foyers intérieurs.....
 Caractéristiques
 Tube-foyer : lisse.....
 — ondulé
 Calcul de l'épaisseur.....
 53. Chaudières à tubes de fumées.....
 Chaudière semi-tubulaire à bouilleurs.....
 54. Tubes de fumées.....
 Nombre, disposition, fixation des tubes.....
 Tubes. Tirants.....
 55. Plaques tubulaires.....
 Calcul de l'épaisseur. Armatures.....
 56. Détails de construction.....
 Dôme de prise de vapeur.....
 Bouilleurs.....
 Massif de maçonnerie.....
 57. Calculs thermiques relatifs à une chaudière semi-tubulaire...
 58. Chaudière de locomotive.....
 Caractéristiques
 Boîte à feu : Entretoises, tirants, armatures.....
 59. Problème de la chambre de combustion.....
 Grille étroite et profonde.....
 Grille large.....
 60. Corps tubulaire.....
 Tubes de fumées.....
 Alimentation
 61. Surchauffeur.....
 62. Boîte à fumées.....
 Échappement réglable à trèfle.....
 Rendement des chaudières de locomotive.....

CHAPITRE V

ÉTUDE DES DIFFÉRENTS TYPES DE CHAUDIÈRES (suite)

63. Chaudières multitubulaires	82
Généralités. Classification.....	82
Circulation de l'eau.....	82
64. Chaudières sectionnelles ou à lames d'eau séparées.....	83
Circulation de l'eau.....	83
Circulation des fumées.....	84
65. Construction.....	84
Faisceau tubulaire. — Collecteur. — Suspension de la chaudière. — Trappes d'expansion.....	84
66. Surchauffeur.....	86
Généralités sur les surchauffeurs.....	86
Température de surchauffe.....	86
67. Calcul du surchauffeur.....	87
68. Application.....	88
69. Réglage de la température de surchauffe.....	89
Mélange de vapeur saturée à la vapeur surchauffée.....	89
Injection d'eau.....	89
Réglage sur le débit des fumées.....	89
Stabilisation automatique.....	89
70. Variantes de la chaudière Babcock et Wilcox.....	89
Chaudière type marine.....	90
Chaudière R. L.....	91
71. Chaudière à circuits guidés. — Chaudière Field.....	91
72. Chaudière multitubulaire Stirling.....	92
Circulation de l'eau et des fumées.....	93
73. Construction.....	93
Collecteurs	94
74. Chaudière ambitubulaire.....	94
75. Chaudière à combustion sous pression.....	96
Chaudière Vélox. — Principe.....	96
Circuit air-fumée. — Circuit eau-vapeur.....	97
76. Chaudière à haute-pression.....	98
Amélioration du rendement du cycle.....	98
Chaudière La Mont à recirculation.....	99

CHAPITRE VI

AUXILIAIRES DES CHAUDIÈRES

77. Généralités	101
Rôle des auxiliaires.....	101
78. Économiseurs	101
Conditions d'établissement.....	101
78 bis. Calculs. — Application.....	102
Température des fumées. — Température de sortie de l'eau.....	102
Calcul de la surface de chauffe	102
Amélioration du rendement thermique de l'installation..	103
79. Construction. — Économiseurs en fonte.....	103

- Dispositifs de sécurité.....
 Tubes en fonte à ailettes.....
80. Économiseurs en acier.....
 Avantages. — Inconvénients.....
81. Réchauffeurs d'air.....
 Rôle. — Conditions d'établissement. — Calculs.....
82. Construction.....
 Réchauffeur d'air à plaques.....
 Réchauffeur d'air à récupération.....
83. Évacuation des fumées. — Tirage naturel.....
 Loi de l'écoulement des fumées.....
 Détermination de la dépression nécessaire.....
84. Calcul de la cheminée.....
 Calcul de H : discussion.....
 Calcul de la section de sortie.....
85. Rôle du registre de tirage.....
86. Cheminées d'usine. — Construction.....
 Carneaux. — Cheminées en briques.....
 Stabilité des cheminées, contraintes.....
87. Application.....
88. Cheminées en béton armé.....
 Cheminées en tôle.....
89. Tirage artificiel.....
 Tirage soufflé.....
 Tirage aspiré.....
90. Tirage aspiré.....
 Tirage aspiré direct.....
 Tirage aspiré induit, en circuit.....
 — — hors circuit.....
 Cheminées.....
91. Dépoussiérage des fumées.....
 Échelles de Ringelmann.....
92. Dépoussiéreurs.....
 Séparation par gravité.....
93. Séparation par centrifugation.....
 Tube-cyclone.....
94. Séparation par action d'un champ électrostatique.....
95. Séparation par lavage.....

CHAPITRE VII

ÉPURATION DES EAUX ALIMENTATION DES CHAUDIÈRES

96. Généralités.....
 Influence des dépôts incrustants.....
97. Eaux d'alimentation des chaudières.....
 Composition.....
98. Épuration dans les chaudières.....
99. Épuration chimique préalable.....
 Épuration par la chaux à froid.....
 — calcosodique à froid.....
 — — à chaud.....

Épuration par permutation sodique	126
— — — H.....	126
— — bipermutation	127
Élimination de la silice.....	127
100. Distillation	127
Différents types d'appareils.....	128
Appareils à multiple effet.....	129
Distillation par turbo-compression et thermo-compression.	130
101. Dégazage	130
102. Alimentation des chaudières.....	131
103. Bouteille alimentaire.....	131
104. Injecteurs	131
Fonctionnement.....	132
105. Injecteur pour locomotives.....	132
Injecteur à eau chaude. — Fonctionnement.....	132
106. Pompes alimentaires.....	133
Pompes à piston. — Pompes centrifuges.....	133

DEUXIÈME PARTIE

UTILISATION DE LA VAPEUR

107. Généralités.....	137
Turbines à vapeur.....	137
Machines à vapeur alternatives.....	137

CHAPITRE VIII

TURBINES A VAPEUR

108. Généralités.....	138
Caractéristiques générales des turbines.....	138
109. Classification des turbines à vapeur.....	139
1° Turbines à action.....	139
a) Turbine de Laval.....	139
b) Roue Curtis.....	139
c) Turbine multicellulaire à action.....	139
2° Turbines à réaction.....	141
110. Classification des turbines à vapeur (<i>suite</i>).....	141
Turbine à un seul corps.....	141
Turbine à plusieurs corps.....	141
Turbine à condensation, à contre-pression, à soutirage...	141
111. Étude thermodynamique de la turbine à vapeur.....	142
Caractéristiques de la vapeur d'eau.....	142
112. Diagrammes de la vapeur d'eau.....	143
113. Lois de l'écoulement d'un fluide élastique.....	143
114. Application aux turbines. Détente de la vapeur.....	144
Écoulement sans frottement, avec frottement.....	144
115. Détermination d'une tuyère.....	145
116. Résultats numériques.....	147

117. Détermination d'une tuyère par le diagramme.....	147
118. Détermination des directrices.....	149
Vitesse. — Section.....	149
Exemple.....	150
119. Détermination des aubes mobiles à action.....	151
Écoulement sans frottement, avec frottement.....	151
Triangles des vitesses.....	151
Calcul des hauteurs radiales.....	152
120. Application.....	153
121. Rendements des turbines à vapeur.....	154
Travail théorique.....	154
Travail utile. — Travail indiqué. — Travail effectif....	154
Rendements, utile, indiqué, mécanique, total.....	155
Consommation de vapeur.....	155
Exemple.....	155
122. Les pertes dans les turbines.....	156
Pertes par frottement des roues dans la vapeur.....	156
Pertes par ventilation.....	156
Pertes par humidité de la vapeur.....	156
Pertes aux presse-garnitures et aux moyeux des diaphragmes	156

CHAPITRE IX

ÉTUDE DES DIFFÉRENTS TYPES DE TURBINES

123. Turbine à action à un élément.....	158
Exemple.....	158
Tuyères. — Aubages.....	158
124. Détermination des sections : tuyères, aubes.....	160
125. Turbine à action à étages de vitesse. — Roue Curtiss.....	161
Calcul des pertes.....	162
126. Aubages. — Choix des angles. — Solutions adoptées....	162
127. Application.....	163
Partie haute-pression d'une turbine à condensation....	163
128. Turbine multicellulaire à action.....	167
Rendement d'aubage.....	167
129. Répartition de la chute adiabatique entre les différents éléments	167
130. Application.....	168
Turbine à contre-pression à quatre étages.....	168
131. Turbines à réaction.....	172
Distributeur. — Roue.....	172
132. Hauteur radiale des aubes.....	173
133. Valeurs numériques.....	174
134. Application.....	174
Partie basse-pression d'une turbine à condensation.....	174

CHAPITRE X

CONSTRUCTION DES TURBINES A VAPEUR

135. Généralités.....	177
136. Plaque-support de turbine ou plaque de fondation.....	179
137. Enveloppe des turbines.....	180
Tubulure d'admission.....	180

138. Culotte d'échappement.....	181
139. Distributeurs. — Diaphragmes.....	181
Étanchéité	181
140. Directrices	183
Matériaux. — Tracé.....	183
141. Rotor. — Disques.....	184
Matériaux. — Équilibrage.....	184
Construction.....	184
142. Détermination d'un disque par le calcul.....	185
Principe de la méthode.....	185
143. Étude de quelques cas particuliers.....	186
Disque d'épaisseur constante.....	186
a) Disque percé au centre.....	186
b) Disque plein.....	187
c) Disque à trou central de faible diamètre.....	187
d) Disque percé au centre avec contraintes n_i n_e	187
144. Disque d'égale résistance.....	188
a) Calcul de la jante.....	189
Application.....	190
b) Calcul du disque.....	190
145. Calcul du moyeu.....	190
146. Aubes motrices.....	191
Tracé. — Construction. — Mise en place.....	191
147. Boîtes étanches.....	193
148. Régulation.....	195
Soupape d'arrêt. — Soupape d'admission.....	195
149. Régulation d'admission.....	196
150. Dispositifs de sécurité : Première sécurité.....	197
151. Deuxième sécurité.....	198
152. Circuits d'huile.....	198
Huile de graissage. — Huile de régulation.....	198

CHAPITRE XI

MACHINES A VAPEUR ALTERNATIVES

153. Classification	199
154. Cycle de la machine à vapeur. — Cycle théorique.....	199
155. Cycle réel	200
156. Calcul des dimensions d'un cylindre.....	201
Sections de passage de la vapeur.....	202
157. Distribution de la vapeur.....	202
Angle de calage réel.....	202
Angle de calage fictif.....	202
Détermination du calage.....	203
158. Épure circulaire.....	203
159. Influence de la variation du calage.....	205
Changement de marche.....	205
160. Coulisse de Walschaerts.....	205
161. Différents types de distributeurs.....	206
Tiroir ordinaire à coquille.....	206
Tiroir cylindrique.....	206
Distributeurs séparés.....	207

162. Construction des machines à vapeur. — Bâties.....	207
Calcul d'une glissière.....	208
163. Cylindres de machines à vapeur.....	209
Cylindre de machine à piston-valves.....	209
Piston-valve d'admission.....	211
Piston-valve d'échappement.....	211
Distribution.....	211
164. Moteur de locomotive.....	212
165. Distribution.....	212
Distribution à phases indépendantes.....	212
166. Principe de la distribution.....	214
Solution : came d'admission.....	214
— came de détente.....	214
— came d'échappement.....	214

CHAPITRE XII

CONDENSATION DE LA VAPEUR

167. Généralités.....	218
168. Classification.....	218
Condenseur par mélange.....	218
Condenseur à surface.....	218
169. Condenseur par mélange.....	219
Calculs.....	219
Disposition générale.....	219
Organes de sécurité.....	219
Éjecteurs d'air.....	220
170. Condenseur à surface.....	220
Faisceau tubulaire.....	220
Éjecteur d'air à deux étages.....	223
171. Calcul d'un condenseur à surface.....	223
Débit d'eau de réfrigération.....	223
Surface d'échange.....	223
172. Eau de réfrigération.....	224
173. Réfrigérants.....	225
Réfrigérant à tirage naturel.....	225
Réfrigérant à tirage forcé.....	226
174. Valeurs numériques.....	226
Bibliographie.....	227
Liste des Maisons de Constructions dont les appareils sont décrits dans cet ouvrage.....	228