COLLECTION DU CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET MÉTIERS PUBLIÉE
SOUS LA DIRECTION DE L. RAGEY

TURBO-MACHINES
HYDRAULIQUES ET THERMIQUES

par

MARCEL SÉDILLE
Ingénieur A. M. et E. C. P., Docteur ès Sciences
Professeur au Conservatoire national des Arts et Métiers
Ancien professeur à l'École Centrale des Arts et Manufactures
Directeur général adjoint de la Société Rateau

TOME III

THERMODYNAMIQUE TECHNIQUE

TRENTO * UNIVERSITÀ BIBLIOTECA

MASSON ET Cie ÉDITEURS
120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS-VIe
1969

TABLE DES MATIÈRES

Pages

INTRODUCTION 1

NOTATIONS 3

CHAPITRE PREMIER. — ***Le premier principe de la thermodynamique ou principe de la conservation de l'énergie*** 5

1. Préambule. 5
2. Notion de température 5
3. Notions de quantité de chaleur et de chaleurs spécifiques . . . 7
4. Équivalence du travail et de la chaleur 8
5. Transformations d'un système. Représentations graphiques. Transformations ouvertes ou fermées 10
6. Fluides en mouvement. Cas des mouvements permanents. Circuits fermés 12
7. Expression du premier principe. L'énergie interne 14
8. Les échanges d'énergie mécanique d'une masse de fluide . . . 19
9. Le théorème des forces vives 23
10. Expression simplifiée du premier principe pour une particule de fluide parfait 24
11. L'expression du premier principe en mouvement relatif. . . . 26
12. L'enthalpie 27
13. Échanges de chaleur d'un fluide avec l'extérieur. Chaleurs spécifiques 33
14. Coefficients élastiques d'un fluide gazeux homogène, compressibilité isotherme et compressibilité adiabatique 36
15. Les gaz parfaits. Notion de température absolue. 39
16. L'échelle légale des températures 40
17. La constante des gaz parfaits. La loi d'Avogadro-Ampère. La masse molaire 41
18. Loi de Joule 43
19. Détentes et compressions adiabatiques d'un gaz parfait. Gaz parfait idéal. 46
20. Chaleurs spécifiques molaires. Énergie interne et enthalpies molaires. 48

CHAPITRE II. — ***Le second principe de la thermodynamique ou principe de Carnot*** 49

21. Notion de source de chaleur et postulat de Clausius. 49
22. Le rendement de la transformation d'énergie thermique en énergie mécanique 53
23. Transformations réversibles et irréversibles 54

Pages

24. Le rendement maximal de la production d'énergie mécanique à partir de deux sources de chaleur. Machine de Carnot 56
25. La température thermodynamique 59
26. Cycles quelconques 64
27. L'entropie 66
28. Travail non compensé. Irréversibilités mécaniques 68
29. Irréversibilités calorifiques intrinsèques 70
30. L'aire d'un cycle 72
31. Entropie d'un gaz parfait 74
32. Les évolutions d'un système thermiquement isolé. Les évolutions adiabatiques réversibles et irréversibles 77
33. Relations entre les coefficients calorifiques d'un fluide quelconque et son équation d'état. Formules de Clapeyron. Formule de Mayer généralisée 80

CHAPITRE III. — ***Propriétés générales des corps purs à l'état fluide*** . 85

34. Introduction 85
35. Équilibres vapeur-liquide-solide. Point critique. Point triple . . 86
36. Pression de saturation 89
37. Volume massique du liquide et de la vapeur saturés. Titre d'un mélange 90
38. Chaleurs de transformation d'état. Formules de Clapeyron . . . 92
39. Les équations d'état des gaz réels 97
40. Propriétés thermodynamiques des gaz parfaits. Leurs chaleurs spécifiques 106
41. Chaleurs spécifiques des gaz réels 110
42. Propriétés des liquides. Leurs chaleurs spécifiques 113
43. Énergie interne, enthalpie et entropie d'un fluide réel (corps pur). 116
44. Calcul de la vitesse du son dans un gaz réel 121
45. Détente de Joule-Thomson ou laminage 122
46. Les gaz raréfiés. Le libre parcours moyen 124
47. Les phénomènes de transport dans le gaz. Viscosité. Conductibilité thermique. Coefficient de diffusion 125

CHAPITRE IV. — ***L'hypothèse de Nernst ou le troisième principe de la thermodynamique*** 131

48. L'hypothèse de Nernst 131
49. L'état solide cristallin. Les chaleurs spécifiques des solides. Loi de Dulong et Petit 133
50. Calcul de l'entropie absolue d'un corps simple 137
51. Interprétation probabiliste de l'entropie. Les théories statistiques de la matière 139
52. Le comportement particulier de l'hélium aux très basses températures 141

CHAPITRE V. — ***Les lois des mélanges des gaz parfaits*** 14

53. Mélanges homogènes. Composition 143
54. Notion de pression partielle. Cas des gaz parfaits. Loi de Dalton. 144
55. Énergie interne et enthalpie d'un mélange de gaz parfaits . . . 146
56. L'entropie d'un mélange de gaz parfaits 148

Pages

CHAPITRE VI. — ***Systèmes monothermes. Réactions de combustion dans les machines thermiques. Énergie utilisable, rendement énergétique et rendement thermique. Pouvoirs calorifiques*** 153

57. Transformations ouvertes 153
58. Réactions chimiques en phase gazeuse. Chaleurs de réaction . . 155
59. Relations de Kirchhoff 160
60. L'affinité 163
61. Potentiels thermodynamiques. Enthalpie libre. Énergie libre . . 164
62. L'énergie utilisable de Gouy 166
63. Cas des installations thermiques 167
64. Rendement énergétique. Rendement thermique. Bilan thermique. 171
65. Pouvoirs calorifiques supérieur et inférieur 175
66. Énergie utilisable de systèmes de composition fixe à évolution monotherme 176

CHAPITRE VII. — ***Enthalpie libre et énergie libre des corps purs et des mélanges. Équilibres physico-chimiques. Règle des phases de Gibbs. Solutions et lois de Raoult et de Henry. Liquéfaction des mélanges de gaz*** 181

67. Enthalpie libre et énergie libre d'un corps pur 181
68. Relations entre l'enthalpie libre, l'énergie libre et l'équation d'état. Formules de Massieu et de Helmholtz 186
69. Enthalpie libre et énergie libre d'un mélange de gaz parfaits . . 187
70. Les mélanges de gaz réels 190
71. Équilibres chimiques dans un mélange de gaz 195
72. Les chaleurs de réaction, les affinités et l'hypothèse de Nernst. . 203
73. Réversibilité des réactions de combustion dans les machines thermiques. Piles à combustibles 206
74. Notions sur la thermodynamique des systèmes à plusieurs phases. Règle des phases de Gibbs 209
75. Changements d'état d'un corps pur. États métastables 215
76. Mélanges de liquides. Solutions. Pression osmotique. Loi de Van't Hoff 219
77. Équilibre des solutions et de leur vapeur. Liquéfaction des mélanges de gaz 224

CHAPITRE VIII. — ***Les diagrammes thermodynamiques*** 233

78. Introduction 234
79. Le diagramme entropique. Propriétés générales 233
80. Tracé du diagramme entropique pour un corps pur. La vapeur d'eau 237
81. Fonctions caractéristiques 240
82. Diagramme de Mollier ou diagramme enthalpique. Cas de l'eau . 242
83. Diagramme (T, s) et diagramme de Mollier des gaz parfaits . . 247
84. Les diagrammes (h, p) et (h, log p). 252
85. Diagrammes thermodynamiques des mélanges de fluide. . . . 253
86. Le diagramme entropique de Stodola pour les gaz 256
87. Influence de la dissociation des gaz sur les diagrammes (T, s) et (H, s). Diagrammes thermodynamiques d'un mélange de gaz en cours de réaction chimique 257
88. L'air humide 259

Pages

CHAPITRE IX. — ***La thermodynamique des phénomènes de tension superficielle*** 266

89. Tension superficielle et attractions moléculaires 266
90. La constante capillaire A 269
91. L'énergie superficielle 270
92. Équilibre de deux phases séparées par une surface courbe . . . 273

BIBLIOGRAPHIE 279

INDEX ALPHABÉTIQUE 281

UNIVERSITA' D. STUDI DI TRENTO
BIBLIOTECA
N. 184568

MASSON ET Cie, ÉDITEURS
120, Boul. St-Germain, PARIS VIe
Dépôt légal : 1er trim. 1969

Imprimé
en France

IMPRIMERIE BARNÉOUD S. A.
LAVAL (Mayenne)
N° 5807. — 3-1969.