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

UNIVERSITA' D. STUDI DI TORINO
BIBLIOTECA

TOME IV

MÉCANIQUE
DES FLUIDES COMPRESSIBLES

MASSON ET Cie ÉDITEURS
120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS-VIe
1970

TABLE DES MATIÈRES

Pages

INTRODUCTION 1

NOTATIONS PRINCIPALES 3

CHAPITRE PREMIER. — ***Relations générales concernant les écoulements adiabatiques des fluides parfaits compressibles. Cas des écoulements unidimensionnels*** 5

1. Équation de Barré de Saint-Venant 5
2. Écoulement isentropique permanent d'un gaz parfait idéal. . . 8
3. Mouvements isentropiques unidimensionnels permanents d'un gaz quelconque 9
4. Tuyères de détente. Théorème d'Hugoniot 10
5. Débit d'une tuyère convergente-divergente ou tuyère de de Laval . 15
6. Débit d'une tuyère convergente. 16
7. Débit d'un orifice en mince paroi 18
8. Mesure des débits des fluides compressibles 18
9. Nombre de Mach et vitesse réduite. 19
10. La similitude des écoulements isentropiques permanents des gaz parfaits idéaux sans viscosité. 25
11. Similitude des fluides compressibles visqueux. Effet de la conductibilité. Limite des régimes d'écoulement moléculaires 27
12. Le rôle de la célérité du son. 28
13. Formation des ondes de choc 30
14. Équations de l'onde de choc droite pour un gaz parfait idéal. . . 32
15. Comportement théorique d'une tuyère de détente pour différents rapports de détente 46
16. Souffleries supersoniques. Amorçage 48

CHAPITRE II. — ***Mouvements isentropiques permanents des fluides compressibles parfaits. Cas des écoulements à deux dimensions. Linéarisation des équations*** 51

17. Équations intrinsèques du mouvement permanent des fluides compressibles 51
18. Équations aux dérivées partielles du potentiel et de la fonction de courant 54
19. Écoulement le long de corps élancés. Linéarisation des équations. . 59
20. Écoulements subsoniques linéarisés. 61
21. Écoulements supersoniques linéarisés 65
22. Écoulement supersonique autour d'une aile d'avion mince . . . 69
23. Intersections et réflexions d'ondes élémentaires 73

Pages

CHAPITRE III. — ***Écoulements supersoniques plans. Méthode générale des caractéristiques*** 76

24. Théorie des caractéristiques. Hodographe d'un écoulement supersonique 76
25. Déviation d'un courant supersonique par une paroi convexe ou concave 80
26. Écoulements comportant simultanément deux systèmes d'onde. Intersection d'ondes élémentaires. 83
27. Écoulement de détente de Prandtl-Meyer autour d'un angle . . . 84
28. Tracé approximatif d'une tuyère de soufflerie supersonique . . . 86
29. Explosion de la veine de sortie d'une tuyère 90
30. Ondes de choc obliques 91
31. Réflexion d'une onde de choc sur la limite d'un jet libre ou sur une paroi. 99
32. Intersection de deux ondes de choc. 101
33. Interaction d'une onde de choc et d'un faisceau d'ondes de détente . 103
34. Formation d'une onde de choc à partir d'ondes élémentaires de compression. 105
35. Ondes de choc obliques à la sortie d'une tuyère convergente-divergente. 106
36. Coupe oblique d'une tuyère convergente-divergente 107
37. Écoulement supersonique autour de profils d'ailes d'avion pour des angles d'incidence importants 109

CHAPITRE IV. — ***Méthodes générales d'étude des écoulements subsoniques plans permanents*** 112

38. Méthode de l'hodographe appliquée aux écoulements subsoniques . 112
39. L'approximation de Karman-Tsien pour les obstacles fins placés dans un courant subsonique parallèle 120
40. Principe de la méthode d'approximation de Rayleigh-Jansen. . . 122
41. Principe de la méthode d'itération de Poggi et Kaplan 124
42. Méthode de Prandtl du développement en série en fonction d'un paramètre d'épaisseur pour une série de profils 125
43. Méthode d'itération à la cuve rhéoélectrique de Taylor et de Malavard 126
44. Méthode graphique de détermination des écoulements subsoniques . 127
45. Méthode de calcul de relaxation par différences finies. Emploi des calculatrices numériques 130

CHAPITRE V. — ***Écoulements soniques et transsoniques*** 135

46. Introduction 135
47. Vortex en fluide compressible 135
48. Source ou puits en fluide compressible. 137
49. Source tourbillon ou puits tourbillon en fluide compressible . . . 138
50. Écoulement de Ringleb 140
51. Lignes-limites 147
52. Écoulement transsonique sur l'extrados d'un profil d'aile. . . . 149
53. Propriétés des lignes-limites. 152
54. Écoulement au col d'une tuyère supersonique. 155
55. Lignes de branchement 161
56. Les ondes de choc détachées. 163

Pages

57. Indication d'un tube de Pitot en écoulement supersonique . . . 166
58. Réflexion d'ondes de choc obliques dite « réflexion de Mach ». Intersections irrégulières d'ondes de choc. 167
59. Passage du mur du son par une aile d'avion 169
60. Calcul d'une aile d'avion en régime transsonique. 173
61. Remarque sur les zones d'influence en régime transsonique . . . 175
62. Difficultés d'expérimentation des écoulements soniques 176

CHAPITRE VI. — ***Les effets de la compressibilité sur les couches-limites. Écoulements dans les tuyauteries compte tenu du frottement et des échanges calorifiques*** . . 180

63. Flux thermique. Coefficient de convection. Nombre de Nusselt . . 181
64. Constitution thermique d'une couche-limite. Couche-limite thermique. Facteur thermique pariétal 183
65. Couche-limite laminaire des fluides compressibles. 187
66. Couche-limite laminaire d'une plaque plane dans le cas d'un fluide compressible avec et sans échanges calorifiques 190
67. Transport turbulent de la chaleur 197
68. Couche-limite turbulente des écoulements de fluides compressibles. Cas de la plaque plane thermiquement isolée. 200
69. Écoulement d'un gaz dans une tuyauterie avec frottement et sans échange calorifique. 205
70. Écoulement isotherme dans les tuyauteries. 218
71. Cas général des écoulements avec frottement, échanges calorifiques et variation de section. 223
72. Ondes de choc avec apports calorifiques ou chocs aérothermodynamiques. Flammes. Détonations. 232
73. Interaction des ondes de choc et des couches-limites. 239

CHAPITRE VII. — ***Les écoulements des gaz réels et des mélanges liquide-vapeur*** 246

74. Écoulement des fluides réels monophasiques 246
75. Écoulements de fluides diphasiques. 251
76. Détente avec retard à la condensation. Choc de condensation. . . 258
77. Chauffage d'un mélange liquide-vapeur s'écoulant dans un tube. . 261

CHAPITRE VIII. — ***Mouvements non permanents des fluides compressibles dans les conduites*** 264

78. Introduction 264
79. L'équation de continuité. 265
80. L'équation de mouvement. L'enthalpie d'une particule 265
81. Équations générales de l'écoulement non permanent dans un tube de section variable (sans échanges calorifiques et sans frottements). Équation générale du potentiel des vitesses. 268
82. Ondes de faible amplitude dans un écoulement de base permanent . 271
83. Ondes sonores. 279
84. Les ondes planes de grande intensité 281

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE. 292

INDEX ALPHABÉTIQUE 295

UNIVERSITA' D. STUDI DI TRENTO
BIBLIOTECA
N. 184569

TRENTO * UNIVERS. D. STUDI DI BIBLIOTECA