

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 I

**MÉCANIQUE
DES FLUIDES INCOMPRESSIBLES**

=====



MASSON ET C^{ie} ÉDITEURS

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN, PARIS-VI^e

1966

TABLE DES MATIÈRES

PRÉFACE	v
INTRODUCTION	1
CHAPITRE PREMIER. — Généralités. Hydrostatique	5
1. <i>L'état fluide</i>	5
1 - 1. Définition. Caractéristiques	5
1 - 2. Actions de contact. Efforts normaux et tangentiels	5
1 - 3. Relation entre les efforts et les déformations. Fluide parfait	6
1 - 4. Isotropie du fluide parfait. Pression	7
1 - 5. Fluides compressibles et incompressibles	8
2. <i>Rappel des notions fondamentales de masse spécifique, poids spécifique et volume spécifique</i>	8
3. <i>Variation de la pression à l'intérieur d'un fluide pesant hydrostatique</i>	10
3 - 1. Hydrostatique	10
3 - 2. Sous-marin	11
3 - 3. Siphon	12
3 - 4. Manomètres à liquide	12
4. <i>Équations générales de l'hydrostatique. Équations d'Euler</i>	14
4 - 1. Forces massiques	14
4 - 2. Équations d'Euler	14
4 - 3. Champs de force dérivant d'un potentiel	15
4 - 4. Surfaces équipression	16
4 - 5. Applications	16
4 - 6. Équilibre d'un liquide contenu dans un récipient en rotation uniforme autour d'un axe vertical	18
4 - 7. Équilibre des liquides hétérogènes pesants	20
4 - 8. Thermosiphon	21
5. <i>Action d'un liquide pesant sur une paroi immergée</i>	22
5 - 1. Paroi plane	22
5 - 2. Application. Barrage ou mur de réservoir	23
5 - 3. Cas général	23
5 - 4. Vanne-papillon	24
6. <i>Poussée d'un liquide au repos sur un corps immobile immergé. Principe d'Archimède</i>	24
6 - 1. Cas général	24
6 - 2. Corps complètement immergé	25
6 - 3. Équilibre vertical d'un corps immergé	26
7. <i>Stabilité des corps flottants</i>	27
8. <i>Centrifugation</i>	29
9. <i>Tension superficielle. Capillarité</i>	30

9 - 1. Généralités	30
9 - 2. Relations de Laplace	31
9 - 3. Relation de Meusnier	32
9 - 4. Exemple : bulle de savon	32
9 - 5. Forme des ménisques	33
9 - 6. Contact de trois liquides ou de deux liquides et un gaz	34
9 - 7. Tubes étroits	35
9 - 8. Valeurs numériques	36
CHAPITRE II. — <i>La dynamique des fluides. Équations générales</i>	38
10. <i>Mouvement d'un fluide : vitesse, accélération, trajectoires, lignes de courant</i>	38
10 - 1. Variables d'Euler	38
10 - 2. Trajectoires. Lignes de courant	38
10 - 3. Mouvements permanents	39
11. <i>Équations intrinsèques du mouvement permanent d'un fluide parfait</i>	39
12. <i>Équation de Bernoulli et ses applications</i>	43
13. <i>Répartition transversale des pressions</i>	49
14. <i>La fonction de courant</i>	52
14 - 1. Débit	52
14 - 2. Fonction de courant	53
15. <i>Écoulements à trois dimensions. Équations générales d'Euler</i>	54
16. <i>Calcul des efforts sur les parois. Applications du théorème des quantités de mouvement</i>	59
16 - 1.	59
16 - 2. Application aux grilles d'aubes	59
16 - 3. Action du jet sur une paroi	61
16 - 4. Réaction d'un jet sortant d'un réservoir	61
16 - 5. Paradoxe de Bergeron	62
16 - 6. Orifice de Borda	63
16 - 7. Évolution d'un jet de liquide pesant à l'air libre	64
16 - 8. Perte de charge par élargissement brusque	66
CHAPITRE III. — <i>La similitude en mécanique des fluides</i>	68
17. <i>Généralités</i>	68
17 - 1. Généralités. Essai sur maquettes	68
17 - 2. Définition de la similitude aérodynamique	69
17 - 3. Homogénéité des équations dans le cas d'un fluide parfait	70
17 - 4. Conditions de similitude de deux mouvements de fluides parfaits pesants	74
17 - 5. Cas où la pesanteur est négligeable	72
18. <i>Analyse dimensionnelle</i>	72
18 - 1. Généralités	72
18 - 2. Exemple	73
19. <i>Théorème de Vaschy-Buckingham</i>	76
CHAPITRE IV. — <i>Les écoulements à potentiel. Cas des fluides incompressibles dans un champ de forces</i>	78
20. <i>Mouvements permanents des fluides parfaits à énergie constante</i>	78
21. <i>Vitesse instantanée de rotation d'une particule. Vecteur tourbillon</i>	79

22. <i>Mouvements à potentiel. Mouvements tourbillonnaires</i>	82
22 - 1. Généralités	82
22 - 2. Tourbillon	83
22 - 3. Importance des écoulements à potentiel.	83
23. <i>Les équipotentiellles. La circulation des vitesses.</i>	84
23 - 1. Équipotentiellles	84
23 - 2. Équipotentiellles. Circulation des vitesses	86
23 - 3.	87
23 - 4.	89
23 - 5.	89
23 - 6. Fonction potentielle	89
24. <i>Étude graphique des écoulements à potentiel</i>	90
24 - 1.	90
24 - 2. Remarque 1.	92
24 - 3. Remarque 2.	92
24 - 4. Remarque 3.	93
24 - 5. Étude graphique de l'écoulement à potentiel dans un canal plan	94
24 - 6. Cas des écoulements à symétrie de révolution	96
24 - 7. Autre méthode de tracé	99
25. <i>Méthode de calcul des écoulements plans permanents à potentiel des fluides incompressibles en l'absence de champs de force. L'aérodynamique. Les organes de turbomachines</i>	100
25 - 1.	100
25 - 2. Emploi des variables complexes	100
25 - 3. Transformations conformes	103
25 - 4. Emploi de la transformation conforme	107
25 - 5. Un exemple important de transformation conforme. Transformation de Joukowski	107
25 - 6. Principe de superposition des écoulements plans irrotationnels d'un fluide incompressible	110
25 - 7. Exemple de superposition d'écoulements	111
26. <i>Calcul de l'écoulement autour d'une aile d'avion</i>	112
26 - 1. Calcul de la circulation	112
26 - 2. Calcul de la force portante	113
26 - 3. Répartition des pressions et des vitesses	114
26 - 4. Résistance. Polaire	116
26 - 5. Remarques	119
27. <i>Écoulement autour d'un ensemble d'obstacles</i>	119
28. <i>Une méthode expérimentale de calcul des écoulements à potentiel. Les cuves rhéo-électriques de Malavard</i>	121
28 - 1. Cuves rhéo-électriques	121
28 - 2. Utilisation des machines à calculer	123
29. <i>Écoulements irrotationnels à 3 dimensions. Sonde de Prandtl.</i>	123
30. <i>Écoulement autour d'ailes d'avion d'envergure limitée. Théorie des ailes portantes de Prandtl. Résistance induite</i>	127
CHAPITRE V. — <i>Les fluides réels. La viscosité. Écoulements laminaires.</i>	130
31. <i>La viscosité. Coefficient de viscosité dynamique et coefficient de viscosité cinématique</i>	131
31 - 1.	131

31 - 2. Le contact avec les parois	132
31 - 3. La viscosité et la théorie cinétique des gaz	133
31 - 4. Viscosité des liquides	135
32. Équations de Navier des liquides visqueux	136
33. Dissipation de l'énergie et perte de charge	138
34. Le nombre de Reynolds	140
35. Mouvement laminaire dans les tubes. Loi de Poiseuille	141
36. Écoulements laminaires en lames minces. Application au graissage hydrodynamique	148
36 - 1.	148
36 - 2. Influence d'un lubrifiant	149
36 - 3. Principe du graissage hydrodynamique	149
36 - 4. Butée à collet	151
36 - 5. Coin d'huile	152
37. Résistance des sphères en régime laminaire	155
38. Notion de couche limite	157
39. Théorie de la couche limite laminaire d'une plaque plane	158
40. L'épaisseur de déplacement de la couche limite	161
41. Le coefficient de frottement	162
42. Les décollements	166
43. Résistance de frottement et résistance de forme	167
44. Couche limite laminaire d'un obstacle quelconque	168
CHAPITRE VI. — Les mouvements turbulents et la rugosité. L'écoulement dans les conduites industrielles	172
45. Insuffisance de la théorie des fluides visqueux	172
46. Analyse statistique d'un écoulement turbulent	173
46 - 1.	173
46 - 2. Le mouvement moyen et le mouvement d'agitation	173
46 - 3. Les probabilités de vitesse	175
47. Équations des mouvements turbulents (fluides incompressibles)	178
48. Structure de la turbulence	181
48 - 1. Notions de bouffées	181
48 - 2. Dimensions des bouffées	182
48 - 3. Le spectre de la turbulence	184
48 - 4. Les phénomènes de diffusion par turbulence	185
48 - 5. La dissipation de l'énergie dans les mouvements turbulents	187
48 - 6. Le travail de formation de la turbulence	188
49. La longueur de mélange de Prandtl	189
50. Le mouvement turbulent dans les tuyaux lisses	191
50 - 1. Coefficient de perte de charge	191
50 - 2. Répartition des vitesses	192
50 - 3. Théories semi-empiriques de l'écoulement turbulent. Hypothèse de Prandtl sur la longueur de mélange près de la paroi	194
50 - 4. Épaisseur de la sous-couche laminaire	199
50 - 5. Loi semi-empirique de résistance de Karman-Prandtl	200
50 - 6. Influence du rapport $\frac{l}{d}$. Passage du régime laminaire au régime turbulent	201

51. <i>Couche limite turbulente des plaques planes lisses</i>	204
51 - 1. Généralités	204
51 - 2. Le point de transition	204
51 - 3. Couche limite turbulente des plaques planes lisses	205
51 - 4. Remarque	207
51 - 5. Répartition des vitesses pour les plaques planes lisses	207
52. <i>La rugosité</i>	208
53. <i>Pertes de charge des conduites rugueuses</i>	210
53 - 1. Essais de Nikuradse	210
53 - 2. Lois de résistance des conduites artificiellement rugueuses de Nikuradse (rugosités homogènes)	212
53 - 3. Cas des conduites industrielles (rugosité hétérogène)	215
54. <i>Frottement des plaques rugueuses</i>	218
55. <i>Pertes de charges singulières des conduites</i>	219
55 - 1.	219
55 - 2.	220
55 - 3. Coefficient de perte de charge	221
55 - 4. Remarque	221
55 - 5. Élargissement brusque	222
55 - 6. Rétrécissement brusque	223
55 - 7. Changements de section convergents	224
55 - 8. Divergents. Efficacité d'un divergent	225
55 - 9. Coudes et changement de direction	228
55 - 10. Coudes avec changement de section	236
55 - 11. Efforts mécaniques sur les coudes et singularités diverses	239
55 - 12. Organes de robinetterie. Vannes-papillons, vannes à opercules	240
55 - 13. Cas où l'on ne possède aucune documentation	244
55 - 14. Entrée d'une conduite. Vortex axial	245
55 - 15. Obstacles divers	248
55 - 16. Conduites de diamètre variable	249
56. <i>Couche limite turbulente d'un obstacle quelconque. Profils d'ailes d'avion laminaires</i>	250
57. <i>Le contrôle des couches limites</i>	255
57 - 1.	255
57 - 2. Remarque 1.	256
57 - 3. Remarque 2.	256
57 - 4. Ailes d'avion	257
57 - 5. L'aspiration de la couche limite	258
57 - 6.	260
57 - 7.	261
57 - 8. Remarque	261
57 - 9. Aile à fente	261
58. <i>Évolution des surfaces de discontinuité. Formation de tourbillons réguliers et diffus. Naissance de la turbulence</i>	262
59. <i>Les effets d'éjection</i>	267
60. <i>Étude théorique des écoulements avec décollements en l'absence d'un champ de forces. Orifices en mince paroi</i>	268
60 - 1.	268
60 - 2. Remarque	272
60 - 3.	272
60 - 4. Orifices de mesure des débits, en mince paroi	272

60 - 5. Remarque 1.	274
60 - 6. Remarque 2.	274
60 - 7. Remarque 3.	275
60 - 8. Naissance de la circulation autour d'une aile d'avion.	275
CHAPITRE VII. — Mouvements des liquides avec surface libre. Canaux et rivières. Déversoirs. Résistance des carènes de navire	277
61. <i>Mouvements avec surface libre. Généralités</i>	277
62. <i>Écoulement d'un liquide, sans pertes, dans un canal découvert</i>	278
62 - 1. Généralités	278
62 - 2. Relations générales.	279
62 - 3. Régime fluvial et régime torrentiel	280
62 - 4. Passage d'un régime à un autre	283
62 - 5. Remarque 1.	285
62 - 6. Remarque 2.	286
63. <i>Ressaut droit</i>	287
63 - 1.	287
63 - 2. Pertes provoquées par le ressaut	288
63 - 3. Aspect du ressaut	289
64. <i>Changement de largeur d'un canal</i>	289
65. <i>Pertes de charge dans les canaux. Formules de Chézy et de Bazin</i>	291
65 - 1. Généralités	291
65 - 2. Écoulement permanent uniforme.	292
65 - 3. Remarque	294
65 - 4. Débitance d'un canal	294
66. <i>Écoulement permanent varié dans un canal donné</i>	295
66 - 1. Équation fondamentale	295
66 - 2. Discussion	297
66 - 3. Écoulements uniformes	299
66 - 4. Écoulements non uniformes des canaux à faible pente	299
66 - 5. Écoulements non uniformes des canaux à forte pente	301
66 - 6. Emplacement du ressaut	303
67. <i>Méthode de calcul de Bakmeteff</i>	304
68. <i>Pertes singulières dans les canaux</i>	306
69. <i>Déversoirs</i>	306
69 - 1.	306
69 - 2. Déversoir rectangulaire en mince paroi sans contraction latérale.	307
69 - 3. Déversoir rectangulaire à mince paroi avec contractions latérales	309
69 - 4. Déversoir triangulaire en mince paroi	309
69 - 5. Déversoir circulaire en mince paroi	310
69 - 6. Déversoirs latéraux	310
70. <i>Mouvements non permanents dans les canaux et rivières. Propagation des intumescences</i>	311
70 - 1. Célérité d'une intumescence	311
70 - 2. Onde solitaire	312
70 - 3.	313
70 - 4. Obstacles dans un écoulement torrentiel	314
71. <i>Mouvements ondulatoires d'un liquide pesant. Houle</i>	314
72. <i>Résistance des carènes</i>	317

CHAPITRE VIII. — <i>Introduction à la mécanique des fluides expérimentale</i>	321
73. <i>Les cas d'application de la théorie des fluides parfaits. Ouvrages courts</i>	321
73 - 1. Généralités	321
73 - 2. Décollements	322
73 - 3. Conclusions	323
73 - 4. Renouvellement des couches limites dans les écoulements accélérés	323
73 - 5. Réduction de la turbulence dans les écoulements accélérés	324
73 - 6. Difficultés pratiques d'application de la théorie des fluides parfaits, même aux ouvrages courts	326
73 - 7. Dérapage des couches limites	327
73 - 8.	328
73 - 9.	330
74. <i>Essais sur modèles. Conditions de similitude</i>	331
74 - 1. Généralités	331
74 - 2. Extrapolations nécessaires	332
74 - 3. Cas où la pesanteur intervient	333
74 - 4. Essais en soufflerie. Aubages de turbo-machines	334
74 - 5. Essais d'organes complexes de machines	336
74 - 6.	336
74 - 7. Distorsion d'un modèle	336
74 - 8. Difficultés dues à l'influence des conditions à l'amont	337
75. <i>Les mesures en mécanique des fluides</i>	338
75 - 1.	338
75 - 2. Mesure des pressions	338
75 - 3. Mesure de la vitesse	340
75 - 4.	341
75 - 5.	341
75 - 6. Direction de la vitesse	342
75 - 7. Mesure des débits	344
76. <i>Installations d'essais. Souffleries de grilles d'aubes. Installations d'essais de maquettes de pompes et turbines hydrauliques. Difficultés particulières d'essais</i>	346
<i>Index alphabétique des matières</i>	357

