

2-532-53-1

Mécanique des fluides

Problèmes résolus avec rappels de cours



Didier Desjardins

Professeur à l'université Bordeaux 1

Michel Combarous

Professeur à l'université Bordeaux 1

Natalie Bonneton

Maître de conférences à l'université Bordeaux 1

DUNOD

Table des matières

AVANT-PROPOS

IX

CHAPITRE 1 • CINÉMATIQUE ET CINÉTIQUE DES ÉCOULEMENTS

1

RAPPELS DE COURS

1.	Vitesse locale du fluide	1
2.	Cinématique eulérienne	1
3.	Champ des accélérations	1
4.	Généralisation à l'expression de quelques dérivées particulières	2
5.	Lignes et tubes de courant, trajectoires, lignes d'émission	3
6.	Taux de rotation ou tourbillon	4
7.	Descriptions cinématiques eulériennes et lagrangiennes	4
8.	Conservation de la masse	4
9.	Équation globale	4
10.	Équation locale de continuité	5
11.	Mouvement isovolume	5

EXERCICES ET PROBLÈMES

1.1	Mouvement d'un fluide au sein d'une machine tournante	5
1.2	Mouvement circulaire de Couette	7
1.3	Mouvement hélicoïdal	8
1.4	Étude d'un mouvement irrotationnel	9
1.5	Étude d'un mouvement de révolution	11
1.6	Équation de continuité en description lagrangienne	12
1.7	Écoulement d'un fluide visqueux à l'entrée d'une conduite	14

CHAPITRE 2 • LOIS DE COMPORTEMENT

15

RAPPELS DE COURS

1.	Tenseur des contraintes et des vitesses de déformation	15
2.	Généralités	16
3.	Fluide classique	16
4.	Situations particulières	15
5.	Dimension et unité des coefficients de viscosité	16
6.	État de contrainte au sein d'un fluide au repos ou d'un fluide parfait en mouvement	17

EXERCICES ET PROBLÈMES

2.1	Contrainte en un point d'un écoulement de Couette	17
2.2	Relation entre les coefficients de viscosité selon l'hypothèse de Stokes	18

CHAPITRE 3 • STATIQUE DES FLUIDES 19

RAPPELS DE COURS 19

1. Équations générales 19
2. Hydrostatique 20
3. Statique des fluides compressibles 20
4. Principe d'Archimède 20

EXERCICES ET PROBLÈMES 20

- 3.1 Mesure de pression dans l'eau 20
- 3.2 Mesure de pression dans l'atmosphère 22
- 3.3 Vanne d'écluse immergée 24
- 3.4 Étude de l'action de l'eau sur la paroi plane d'un barrage 26
- 3.5 Résultante des forces de pression qui s'exercent sur un bol 28
- 3.6 Corps immergé dans deux fluides différents 29
- 3.7 Force ascensionnelle d'un ballon 30

CHAPITRE 4 • ÉQUATIONS LOCALES DU MOUVEMENT : APPLICATIONS AUX FLUIDES PARFAITS 32

RAPPELS DE COURS 32

1. Énoncé fondamental 32
2. Équation locale générale 33
3. Équation d'Euler 33
4. Théorème de Bernoulli 33

EXERCICES ET PROBLÈMES 34

- 4.1 Tube de Pitot 34
- 4.2 Tube de Venturi 34
- 4.3 Formule de Torricelli 37
- 4.4 Déversoir à bord mince 38
- 4.5 Équations intrinsèques 40
- 4.6 Mise en mouvement d'un liquide parfait dans une conduite coudée 46

CHAPITRE 5 • THÉORÈME DES QUANTITÉS DE MOUVEMENT 51

RAPPELS DE COURS 51

1. Énoncé du théorème 51
2. Équation de conservation de la quantité de mouvement 53

EXERCICES ET PROBLÈMES	53
5.1 Efforts exercés sur une canalisation hydraulique	53
5.2 Résultante des forces de pression sur une lance à incendie	54
5.3 Action d'un jet sur une plaque plane	56
5.4 Centrale hydroélectrique	61
5.5 Étude d'un mélangeur cylindrique	67
5.6 Écoulement dans une conduite avec élargissement brusque	68
5.7 Écoulement à travers une persienne	71
5.8 Sustentation par coussin d'air	76
5.9 Ressaut hydraulique	81
5.10 Distribution d'eau dans une tuyauterie à bifurcation	83
5.11 Efforts sur une écluse	87
5.12 Éolienne	89
5.13 Étude d'un propulseur	93
5.14 Ventilation d'un tunnel par injection latérale	97
5.15 Étude d'un tourniquet	101

CHAPITRE 6 • ÉCOULEMENTS PLANS DE FLUIDES PARFAITS **105**

RAPPELS DE COURS	105
1. Fonction de courant, potentiel des vitesses, potentiel complexe	105
2. Conditions aux frontières, calcul des forces de pression	106
3. Écoulements élémentaires	106
4. Superposition d'écoulements	107
5. Calcul des efforts sur une paroi	107
6. Transformation conforme, théorie des profils	108

EXERCICES ET PROBLÈMES	109
6.1 Efforts exercés sur des singularités	109
6.2 Écoulement le long d'une paroi rugueuse sinusoïdale	111
6.3 Écoulement résultant de la superposition d'écoulements à potentiel complexe	112
6.4 Étude d'un écoulement dans un angle droit	116
6.5 Écoulement à travers une série d'obstacles profilés	119
6.6 Écoulement plan autour d'un ovale	124
6.7 Écoulement autour d'un obstacle à cavité illimitée	131
6.8 Écoulement plan autour d'un cercle (1)	136
6.9 Écoulement plan autour d'un cercle (2)	137
6.10 Tourbillon au sein d'un écoulement uniforme en présence d'une paroi plane	141
6.11 Étude par la transformation de Joukowski de l'écoulement autour d'une plaque plane	146
6.12 Écoulement autour d'un cylindre	151

CHAPITRE 7 • ÉCOULEMENTS DE RÉVOLUTION IRROTATIONNELS PERMANENTS D'UN FLUIDE PARFAIT INCOMPRESSIBLE 157

RAPPELS DE COURS

- | | | |
|----|-------------------------------|-----|
| 1. | Définition et notations | 157 |
| 2. | Potentiel des vitesses ϕ | 157 |
| 3. | Fonction de courant ψ | 158 |

EXERCICES ET PROBLÈMES

- | | | |
|-----|---|-----|
| 7.1 | Comparaison entre les écoulements à potentiels autour d'un cylindre et d'une sphère | 160 |
| 7.2 | Image d'une source et d'un doublet par rapport à une sphère | 163 |
| 7.3 | Écoulement autour d'un tube de Pitot | 168 |
| 7.4 | Écoulement autour d'une sphère immobile | 172 |

CHAPITRE 8 • ONDES DE SURFACE 177

RAPPELS DE COURS

- | | | |
|----|------------------------|-----|
| 1. | Système d'équations | 177 |
| 2. | Conditions aux limites | 178 |

EXERCICES ET PROBLÈMES

- | | | |
|-----|------------------------------|-----|
| 8.1 | Houle sinusoïdale | 180 |
| 8.2 | Onde de gravité interfaciale | 184 |

CHAPITRE 9 • ÉCOULEMENTS COMPRESSIBLES D'UN FLUIDE PARFAIT BAROTROPE 191

RAPPELS DE COURS

- | | | |
|----|--|-----|
| 1. | Le gaz parfait | 191 |
| 2. | Évolution isotherme | 192 |
| 3. | Évolution adiabatique | 192 |
| 4. | Conséquence du caractère irrotationnel de l'écoulement | 192 |
| 5. | Relations entre c , ρ , p et q dans le cas d'écoulement adiabatique | 194 |
| 6. | Écoulement dans un tube de courant | 195 |

EXERCICES ET PROBLÈMES

- | | | |
|-----|--|-----|
| 9.1 | Régimes continus dans une tuyère (buse de Laval) | 195 |
| 9.2 | Fluide parfait compressible en évolution isotherme | 198 |
| 9.3 | Écoulement isentropique dans une tuyère | 199 |
| 9.4 | Étude d'un vol subsonique | 204 |
| 9.5 | Vol supersonique d'un avion | 205 |
| 9.6 | Propulseur à réaction | 207 |

CHAPITRE 10 • SOLUTIONS SIMPLÉS DES ÉQUATIONS DE NAVIER-STOKES 213**RAPPELS DE COURS 213**

1. Équations locales du mouvement isovolume 213
2. Stabilité des solutions des équations de Navier-Stokes 214

EXERCICES ET PROBLÈMES 215

- 10.1 Modèle schématique du mouvement d'un glacier 215
- 10.2 Écoulement de Poiseuille 220
- 10.3 Écoulement dans une conduite de section droite non circulaire 223
- 10.4 Écoulement visqueux entre deux tubes cylindriques dont l'un est mobile 230
- 10.5 Amortisseur hydraulique 234
- 10.6 Écoulement de Couette 238
- 10.7 Viscosimètre de Weissenberg 242
- 10.8 Écoulement visqueux autour d'un disque plan en rotation uniforme 246
- 10.9 Écoulement laminaire autour d'une sphère 248
- 10.10 Théorie du graissage hydrodynamique 252
- 10.11 Palier hydrodynamique 258
- 10.12 Sphère immobile au sein d'un fluide visqueux en écoulement uniforme à l'infini 263
- 10.13 Tourbillon visqueux 270
- 10.14 Écrasement d'un fluide visqueux entre deux plaques 275
- 10.15 Effet Fahraeus Lindquist 280

CHAPITRE 11 • NOTIONS DE COUCHE LIMITE ET DE TURBULENCE 285**RAPPELS DE COURS 285**

1. Notion de couche limite 285
2. Notion de turbulence 285
3. Vitesse moyenne et vitesse d'agitation 286

EXERCICES ET PROBLÈMES 287

- 11.1 Plaque oscillante 287
- 11.2 Calculs élémentaires de corrélation en écoulement turbulent 291
- 11.3 Étude de la transition laminaire-turbulent pour l'écoulement autour d'une sphère 298

ANNEXES 299

- Identités remarquables entre opérateurs vectoriels 299
- Coordonnées cylindriques 299
- Coordonnées sphériques 303

BIBLIOGRAPHIE 306**INDEX 307**

SCIENCES SUP

Didier Desjardins
Michel Combarous
Natalie Bonneton

MÉCANIQUE DES FLUIDES

Problèmes résolus avec rappels de cours

La mécanique des fluides est l'un des premiers domaines de la physique où se sont développés approches quantitatives et formalismes mathématiques. Aujourd'hui, la maîtrise de cette discipline est d'autant plus précieuse que ses applications industrielles sont nombreuses et les sujets de recherche variés. Cet ouvrage propose un grand nombre de problèmes traitant de cas réels, tous corrigés de manière très détaillée et précédés de rappels de cours brefs mais précis.

L'ouvrage aborde les aspects généraux de la cinétique eulérienne ou lagrangienne, comme les lois générales de conservation de masse ou de quantité de mouvement. Il traite abondamment de la statique et de la dynamique des fluides parfaits (étude des écoulements plans ou de révolution à potentiel), et couvre certains aspects de la mécanique des fluides compressibles. Il expose également quelques applications aux équations de Navier-Stokes.

Cet ouvrage est destiné aux étudiants en mécanique et physique de second cycle universitaire, aux élèves en écoles d'ingénieurs et aux candidats à l'agrégation.



DIDIER DESJARDINS
est professeur à
l'université Bordeaux 1.

MICHEL COMBAROUS
est professeur à
l'université Bordeaux 1.

NATALIE BONNETON
est maître de conférences
à l'université Bordeaux 1.

MATHÉMATIQUES

PHYSIQUE

CHIMIE

SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

INFORMATIQUE

SCIENCES DE LA VIE

SCIENCES DE LA TERRE



9 782100 046515

ISBN 2 10 004651 9

• <http://www.dunod.com>



Didier Desjardins
Michel Combarnous Natalie Bonneton

2^e et 3^e CYCLES • ÉCOLES D'INGÉNIEURS

Mécanique des fluides

Problèmes résolus avec rappels de cours



DUNOD