

Sakir Amiroudine
Jean-Luc Battaglia

Mécanique des fluides

4^e édition

DUNOD

Illustration de couverture : © Luvricon – Shutterstock

© Dunod, 2011, 2014, 2017, 2022

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-084257-5

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Préface

Comme je l'indiquais dans la préface de la première édition de cet ouvrage, depuis maintenant nettement plus de vingt ans, Jean-Luc Battaglia et Sakir Amiroudine sont des acteurs particulièrement actifs dans le vaste champ de la mécanique des fluides et des phénomènes de transfert, dans nombre de ses aspects, tant de recherche que d'enseignement.

Jean-Luc Battaglia est d'ailleurs, avec deux autres collègues, Andrzej Kusiak et Jean-Rodolphe Puiggali, auteur dans la même collection que le présent ouvrage d'une « Introduction aux transferts thermiques », dont la première édition est parue en 2010, document qui présente une structure et un équilibre entre éléments de cours et exercices très proches du présent ouvrage.

Les quatre auteurs des deux ouvrages sont des enseignants dynamiques et des chercheurs très actifs, tous membres de l'Institut de mécanique et d'ingénierie de Bordeaux (I2M), un laboratoire de recherche « multi-tutelles » rassemblant plus de 300 personnes, rattaché au CNRS, à l'Université de Bordeaux, à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, à l'Institut Polytechnique de Bordeaux, ainsi qu'à l'INRA.

Les domaines de recherche de Jean-Luc Battaglia et Sakir Amiroudine, élaboration et caractérisation des matériaux dans des conditions extrêmes (la rentrée atmosphérique de véhicules spatiaux, par exemple, ou les microréacteurs et la microfluidique associée), modélisation théorique et numérique de l'hydrodynamique des fluides complexes (les fluides en conditions supercritiques, par exemple), les ont tout naturellement sensibilisés à une grande rigueur dans la définition des concepts de base de la mécanique des fluides, rigueur indispensable pour élaborer et exploiter les modèles, tant physiques que numériques, aux limites de leurs possibilités.

Ces deux collègues ont conforté leurs savoirs dans le cadre d'une certaine mobilité géographique, une mobilité qui a enrichi leurs expériences personnelles :

- enseignements dans les universités et en écoles d'ingénieurs ;
- séjours de recherche de longue durée, avec présentation de séminaires, en Allemagne, en Italie et aux États-Unis ;
- expérience de nos universités nationales non métropolitaines, l'université d'Antilles-Guyane, en l'occurrence ;
- production d'ouvrages de recherche, en français et anglais, au-delà des deux seuls cités ici ;
- démarches d'enseignement très complètes : enseignements en cours formalisés, travaux dirigés variés, travaux pratiques.

L'ouvrage proposé consacre beaucoup de place à la clarification des concepts, dans le corps principal du texte certes, mais avec, également, un rôle important dévolu aux exercices, en nombre significatif, développés, avec leurs solutions, sur plus d'une centaine de pages.

Le niveau général de cet ouvrage, très complet pour les étudiants de licence et de master auquel il s'adresse principalement, est un excellent moyen d'accès à des ouvrages de mécanique, de cours ou de problèmes, plus difficiles, proposés ici et là aux étudiants plus avancés, y compris par le même éditeur.

Comme je l'ai parfois déjà indiqué dans des introductions concernant ces auteurs, je ne doute absolument pas que cette édition constituera, comme les deux premières et probablement mieux encore, pour bien des étudiants, un outil tout à fait efficace pour la compréhension de bien des aspects de la mécanique des fluides.

Michel Combarous

*Professeur Émérite à l'Université de Bordeaux
Membre correspondant de l'Académie des Sciences
Membre fondateur de l'Académie des Technologies*

Table des matières

Préface	III
Avant-propos	XIII
Nomenclature	XV
1 Introduction et concepts fondamentaux	1
1. Définition d'un fluide	2
2. Concept de continuum	3
3. Définition d'une contrainte	5
4. Propriétés des fluides	6
4.1 Masse volumique, volume spécifique et poids spécifique	6
4.2 Viscosité	8
5. Relations thermodynamiques des gaz parfaits	14
5.1 Gaz Parfait	14
5.2 Énergie interne et enthalpie	16
5.3 Premier principe de la thermodynamique	17
5.4 Entropie et second principe de la thermodynamique	17
5.5 Compressibilité	19
6. Phénomènes d'interface fluide-fluide et fluide-solide	23
6.1 Tension superficielle	23
6.2 Équation de Young-Laplace	26
6.3 Loi de Laplace pour une surface quelconque	27
6.4 Phénomène de mouillabilité pour le contact fluide-solide	28
L'essentiel	31
Entraînez-vous	32
Solutions	36
2 Statique des fluides	41
1. Relation fondamentale de la statique	42
1.1 Force de pression	42
1.2 Principe fondamental de la statique (PFS)	42
1.3 Utilisation de la formulation continue	44
2. Intégration de la relation de l'hydrostatique	45
2.1 Cas simple	45
2.2 Cas où la masse volumique varie	46

3. Manomètres	49
4. Efforts exercés sur une surface indéformable – point d'application de la résultante	51
5. Loi de Jurin	55
6. Principe d'Archimède	56
L'essentiel	60
Entraînez-vous	61
Solutions	64

3 Cinématique des fluides	69
1. Introduction	69
1.1 Méthode lagrangienne (Joseph Louis Lagrange, 1736-1813)	70
1.2 Méthode eulérienne (Leonhard Euler, 1707-1783)	71
1.3 Relation entre la méthode eulérienne et lagrangienne	71
2. Dérivée particulaire et accélération	71
3. Lignes de courant, trajectoires et lignes d'émission	73
3.1 Lignes de courant	73
3.2 Trajectoires	74
3.3 Lignes d'émission	75
4. Translation, rotation et déformation	76
4.1 Écoulement uniforme	76
4.2 Translation avec déformations linéaires	76
4.3 Déformation angulaire	78
4.4 Tenseur des taux de rotation – Vecteur tourbillon	80
4.5 Vitesse de déformation quelconque d'un élément fluide	81
5. Fonction de courant – Écoulement incompressible	82
5.1 Définition	82
5.2 Propriétés	83
6. Écoulement irrotationnel – Potentiel des vitesses	84
7. Représentation d'écoulements par des fonctions complexes	86
8. Exemples d'écoulements complexes	87
8.1 Écoulement uniforme	87
8.2 Écoulement plan autour d'une source ou d'un puits	88
8.3 Vortex ou tourbillon libre	89
8.4 Association d'une source et d'un puits : doublet et dipôle	90
8.5 Écoulement autour d'un cylindre	92
8.6 Écoulement autour d'un cylindre avec circulation	93

L'essentiel	96
Entraînez-vous	97
Solutions	99

4	Dynamique des fluides parfaits : équation de Bernoulli et bilans sur un volume de contrôle	105
	1. Introduction	106
	2. Théorème de Bernoulli	106
	2.1 Démonstration par la conservation de l'énergie	106
	2.2 Démonstration du théorème de Bernoulli à partir du Principe Fondamental de la Dynamique (PFD)	108
	2.3 Cas de l'écoulement irrotationnel en régime transitoire	110
	3. Méthodologie de construction des bilans macroscopiques	110
	3.1 Objectifs	110
	3.2 Méthodologie de construction des bilans macroscopiques	110
	4. Bilan macroscopique de masse	112
	4.1 Définition	112
	4.2 Application à un écoulement unidirectionnel	112
	5. Bilan macroscopique de quantité de mouvement	113
	5.1 Formulation générale	113
	5.2 Application à un écoulement unidirectionnel	114
	6. Bilan macroscopique pour le moment angulaire	115
	7. Relations de Blasius	116
	L'essentiel	118
	Entraînez-vous	119
	Solutions	124

5	Écriture locale des équations de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie	135
	1. Lois de transport	136
	1.1 Introduction	136
	1.2 Application à une grandeur scalaire	136
	1.3 Application à une grandeur vectorielle	139
	2. Forme locale des équations de conservation	139
	2.1 Conservation de la masse	139
	2.2 Conservation de la quantité de mouvement	141

2.3 Conservation du moment de quantité de mouvement	143
2.4 Conservation de l'énergie	144
3. Expression du théorème de Bernoulli	146
4. Relations de Navier-Stokes	149
4.1 Tenseur des contraintes	149
4.2 Loi de comportement de Navier-Stokes	150
4.3 Les équations de Navier-Stokes	152
5. Approximation de la lubrification hydrodynamique	153
6. Notion de couche limite	154
6.1 Introduction	154
6.2 Bilan de masse	155
6.3 Bilan de quantité mouvement	156
L'essentiel	161
Entraînez-vous	162
Solutions	165
6 Rhéologie des fluides	173
1. Introduction	173
2. Comportement pseudo-plastique	174
2.1 Explication phénoménologique	174
2.2 Loi d'Ostwald	175
2.3 Généralisation de la loi-puissance au cas tridimensionnel	176
3. Comportement viscoélastique	177
3.1 Gonflement en sortie de filière	177
3.2 Effet Weissenberg	178
3.3 Explication phénoménologique et modélisation	179
3.4 Comportement transitoire	180
4. Loi de comportement d'un matériau viscoélastique en 1D	181
4.1 Cellule de Maxwell	182
4.2 Relaxation de la contrainte	182
4.3 Recouvrance de la déformation	182
5. Lois de comportement d'un matériau viscoélastique en 3D	183
5.1 Différence de contraintes normales	183
5.2 Lois à dérivation convective de la contrainte	184
L'essentiel	188
Entraînez-vous	189
Solutions	192

7	Analyse dimensionnelle et principe de similitude	203
1.	Introduction	203
1.1	Similitude géométrique	204
1.2	Similitude cinématique	204
1.3	Similitude dynamique	205
1.4	Écoulements gouvernés par les forces visqueuses, de pression et d'inertie	205
1.5	Écoulements avec forces de gravité, de pression et d'inertie	206
1.6	Écoulements avec tension de surface comme force dominante	207
1.7	Écoulements à force élastique	208
1.8	Écoulements oscillatoires	209
1.9	Dimensions des quantités physiques	209
2.	Théorème de Vashy-Buckingham	210
2.1	Constitution du système linéaire	210
2.2	Détermination des termes π	210
3.	Exemples d'application	211
3.1	Écoulement incompressible dans une conduite cylindrique	211
3.2	Écoulement incompressible autour d'une sphère	212
4.	Analyse dimensionnelle sur les équations de transport	213
	L'essentiel	217
	Entraînez-vous	218
	Solutions	219
8	Turbulence	223
1.	Introduction	223
2.	Les caractéristiques de la turbulence	224
3.	La transition laminaire – turbulent	225
4.	Fonctions de corrélation, mouvement moyen et fluctuations	226
5.	Équations pour un écoulement turbulent	230
6.	Équations de couche limite turbulente sur une plaque plane	232
6.1	Équations de couche limite	232
6.2	Conditions aux limites	233
7.	Modèle de contrainte de cisaillement	235

8. Distribution de vitesse et coefficient de frottement pour les écoulements dans des tubes à grand nombre de Reynolds	237
L'essentiel	241
Entraînez-vous	242
Solutions	243
9 Théorème de Bernoulli généralisé	245
1. Utilisation du théorème de Bernoulli avec les fluides réels	245
2. Conséquence de l'hypothèse d'écoulement unidirectionnel	247
3. Écoulement d'un fluide à l'entrée d'une conduite	249
4. Pertes de charge régulières	250
4.1 Coefficient de perte de charge	250
4.2 Coefficient de perte de charge en régime laminaire	252
4.3 Coefficient de perte de charge en régime turbulent	253
4.4 Pertes de charge dans les conduites non circulaires	257
5. Pertes de charge singulières	257
6. Pertes de charge pour un écoulement à surface libre dans un canal	260
L'essentiel	262
Entraînez-vous	263
Solutions	265
10 Écoulements autour d'obstacles – traînée et portance	269
1. Notion de portance et traînée	269
2. Forces agissant sur l'obstacle	270
3. La traînée	272
3.1 Traînée pour un cylindre	272
3.2 Cas du fluide visqueux	275
3.3 Traînée pour une sphère	277
4. La portance – Effet Magnus	279
5. Écoulement autour d'un profil d'aile d'avion	280
6. Décollement de la couche limite	282

L'essentiel	286
Entraînez-vous	287
Solutions	289
11 Écoulements compressibles – Ondes de choc et écoulement dans les tuyères	293
1. Introduction	294
2. Vitesse du son	294
3. Écoulement isentropique et point d'arrêt	297
4. Ondes de choc	299
4.1 Définition	299
4.2 Ondes de choc normal	301
4.3 Onde de choc oblique	304
4.4 Onde de détente	307
5. Effets de la variation de la section sur les propriétés de l'écoulement dans le cas isentropique	311
6. Distribution de pression et phénomène de blocage sonique dans une tuyère convergente	317
7. Écoulement compressible dans une tuyère convergente-divergente	319
L'essentiel	322
Entraînez-vous	323
Solutions	325
12 Introduction aux milieux poreux	329
1. Introduction générale	329
2. Paramètres géométriques d'un milieu poreux	330
2.1 Porosité	330
2.2 Aire spécifique	331
2.3 Tortuosité	331
3. Équation de Darcy	333
4. Modèles de perméabilité	334
5. Extensions de la loi de Darcy	335
5.1 Équation de Dupuit-Forcheimer (DF)	336
5.2 Équation de Brinkmann	337
5.3 Conditions aux limites hydrodynamiques	337

Table des matières

L'essentiel	339
Entraînez-vous	340
Solutions	342
Annexes	347
Bibliographie	359
Index	361

Avant-propos

Ce livre a été écrit comme un premier cours en mécanique des fluides pour des étudiants de niveau Licence Master, et écoles d'ingénieurs. D'après notre expérience en tant qu'enseignants depuis de nombreuses années, nous avons remarqué que la mécanique des fluides est une des disciplines les plus difficiles à assimiler. Elle fait appel aussi bien à des connaissances théoriques mathématiques (calcul tensoriel, opérateurs de divergence et de gradient, théorème de Green ou notion de potentiel complexe...) qu'à des bases de la physique (force d'Archimède, équation de Bernoulli, pertes de charge, aérodynamique ou notion de similitude...).

Les auteurs ont structuré ce livre en douze chapitres. Le premier traite des notions fondamentales sur les propriétés en mécanique des fluides telles que la contrainte, la viscosité, la compressibilité qui, elle, fait appel aux bases de la Thermodynamique et enfin la notion de tension de surface. Le deuxième chapitre est consacré au principe fondamental de la statique ainsi qu'à la force d'*Archimède*. Le troisième chapitre, qui est malheureusement de moins en moins traité dans les universités, aborde la cinématique des fluides. Il traite particulièrement des écoulements plans 2D dans le cas d'écoulements incompressible et irrotationnel. L'introduction de la fonction potentiel complexe facilite la résolution de nombreux problèmes d'écoulement autour de profils. Le chapitre 4 aborde la dynamique des fluides parfaits, donc dénués de viscosité. L'équation de Bernoulli est à la base de la résolution de nombreux problèmes d'ingénierie. Ces premiers chapitres constituent les outils de base de l'ingénieur pour la résolution de problèmes réels en mécanique des fluides. Afin d'aller plus loin, le chapitre 5 introduit d'abord le théorème de transport, dit de *Reynolds*, avant de développer les équations générales régissant un écoulement de fluide réel : (i) conservation de la masse, (ii) conservation de la quantité de mouvement et (iii) conservation de l'énergie. Ce chapitre est certainement le plus complexe d'un point de vue mathématique mais il est à la base de la compréhension de l'ensemble des phénomènes de transport dans un fluide visqueux et en particulier il conduit à la formulation des fameuses équations de Navier Stokes pour les fluides newtoniens. La notion de couche limite, importante pour comprendre les phénomènes d'écoulement autour de profils, est aussi abordée dans ce chapitre. De nombreuses applications industrielles actuelles traitent des écoulements de fluides non newtoniens (polymère, cosmétique, agro-alimentaire...). Le chapitre 6 leur est consacré. On fait souvent des tests dans des souffleries avant la conception des produits réels : la notion de similitude paraît essentielle et ceci fait l'objet du chapitre 7. Le chapitre 8 donne une introduction très générale de la turbulence et traite la fermeture du problème des tenseurs de *Reynolds* (inconnue supplémentaire). Ces notions sont essentielles pour traiter les problèmes d'écoulements avec pertes de charge ; c'est l'objet du chapitre 9. Les chapitres 10 et 11, un peu plus spécifiques et en connexion avec l'aérodynamique, concernent les problèmes d'écoulements autour d'obstacles (par exemple un profil d'aile)

et les écoulements compressibles. Enfin le chapitre 12 introduit les milieux poreux avec l'équation de Darcy et ses variantes (Dupuit-Forchheimer, Brinkman).

À la fin de chaque chapitre, le lecteur trouvera quelques exercices d'application. Ces exercices ont été choisis de manière à mettre en œuvre l'ensemble des connaissances du cours sur des configurations pratiques et couramment rencontrées par l'ingénieur. Quelques références bibliographiques sont données à la fin de la partie de cours pour chaque chapitre pour permettre à ceux qui le désirent de rentrer plus avant dans les nombreux concepts théoriques qui essaient le domaine de la mécanique des fluides.

Dans cette nouvelle édition, de nombreuses améliorations ont été apportées tant sur les parties de cours que sur les exercices d'application.

Avec ce livre, les auteurs espèrent donner un éclairage clair des concepts de base de la mécanique des fluides et de ses applications courantes. Un effort constant de rédaction a été réalisé pour couvrir les points essentiels sans trop rentrer dans les détails mathématiques compliqués. Dans ce sens nous avons voulu mettre à disposition des étudiants de Licence et de Master ainsi qu'aux élèves de grandes écoles un ouvrage dédié aux applications pratiques de la mécanique de fluides.

Les auteurs

Nomenclature

Symboles romains	
A	Section (m^2)
$a, \vec{a}$	Accélération ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
C_p, C_v	Chaleur massique à pression et volume constant ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
C	Couple (N.m)
d	Densité
e	Énergie interne massique (ou spécifique) ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)
E	Module d'élasticité ou module de Young (Pa) / énergie interne (J)
f	Fonction potentiel complexe
$F, \vec{F}$	Force (N)
$\vec{g}$	Accélération de la pesanteur ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
h	Enthalpie massique (ou spécifique) ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$)
$k_B = 1,381 \times 10^{-23}$	Constante de Boltzmann ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$)
m	Masse (kg)
$\vec{M}$	Moment (N.m)
$N_A = 6,022 \times 10^{23}$	Nombre d'Avogadro (mol^{-1})
P, p	Pression ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ou Pa)
Q	Énergie sous forme de chaleur (J)
q_v, Q_v, Q_m	Débit volume ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) et débit masse ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)
$r = C_p - C_v$	Constante du gaz parfait ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
$R = 8,314$	Constante universelle des gaz parfaits ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
s	Entropie massique (ou spécifique) ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)
S	Surface (m^2)

Nomenclature

Symboles romains	
t	Temps (s)
T	Température (K)
$U, \vec{U}, u, \vec{u}$	Vitesse ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
V	Volume (m^3)
v	Volume massique (ou spécifique) ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)
W	Énergie sous forme de travail (J)
z	Hauteur (m)
Symboles grecs	
β_p	Coefficient de dilatation à pression constante (K^{-1})
$\dot{\alpha}$	Taux d'étirage (s^{-1})
χ_T	Coefficient de compressibilité isotherme (Pa^{-1})
χ_s	Coefficient de compressibilité isentropique (Pa^{-1})
δ_{ij}	Symbole de Kronecker
ϕ	Fonction potentiel ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
$\gamma = C_p / C_v$	Apport des chaleurs spécifiques
γ_g	Poids spécifique ($\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$)
$\dot{\gamma}$	Taux de déformation 1D (s^{-1})
Γ	Circulation ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
λ	Libre parcours moyen (m)
Λ	Coefficient de pertes de charge régulières
μ	Viscosité dynamique ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
ν	Viscosité cinématique ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)
ψ	Fonction courant ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
ρ	Masse volumique ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

Symboles grecs	
σ	Tension superficielle ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$) / Contrainte ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)
τ	Contrainte de cisaillement ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$)
$\vec{\omega}$	Vecteur vitesse de rotation (s^{-1})
ξ	Vitesse complexe ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
$\vec{\Omega}$	Vecteur tourbillon (s^{-1})
Tenseurs	
δ_{ijk}	Tenseur de permutation
$\overline{\sigma}$	Tenseur des contraintes
$\overline{s}$	Déviateur des contraintes
$\overline{\varepsilon}$	Tenseur des déformations
$\dot{\overline{\varepsilon}}$	Tenseur des taux de déformation
$\overline{R}$	Tenseur des rotations
$\dot{\overline{R}}$	Tenseur des taux de rotation
Nombres sans dimension ¹	
Ca	Nombre de Cauchy
Eu	Nombre d'Euler
Fr	Nombre de Froude
Kn	Nombre de Knudsen
Ma	Nombre de Mach
Re	Nombre de Reynolds
St	Nombre de Strouhal
We	Nombre de Weber
Wo	Nombre de Womersley

Nomenclature

Opérateurs	
$\vec{\nabla}$	Gradient
$\vec{\nabla} \cdot$	Divergence
$\vec{\nabla} \wedge$	Rotationnel
Δ	Laplacien

1. Un nombre sans dimension est généralement désigné par deux lettres, les deux premières du nom de celui qui, souvent le premier, a mis en évidence son intérêt.

