

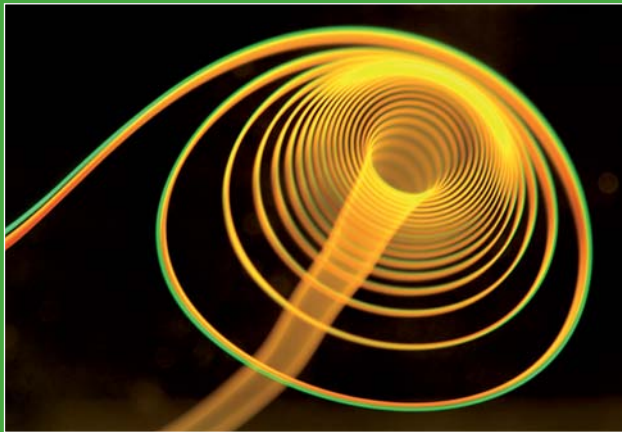
SAVOIRS

PHYSIQUE

ACTUELS

# HYDRODYNAMIQUE PHYSIQUE

3<sup>e</sup> ÉDITION



ÉTIENNE GUYON,  
JEAN-PIERRE HULIN  
ET LUC PETIT

CNRS ÉDITIONS

Extrait de la publication

EDP SCIENCES

Étienne Guyon, Jean-Pierre Hulin  
et Luc Petit

# Hydrodynamique physique

3<sup>e</sup> édition

*Préface de*  
John Hinch

S A V O I R S    A C T U E L S

---

EDP Sciences/CNRS ÉDITIONS

*Illustration de couverture* : Visualisation de filets de colorant dans un filament de tourbillon (courtoisie P. Petitjeans).

Imprimé en France.

© 2012, **EDP Sciences**, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf, 91944 Les Ulis Cedex A

et

**CNRS ÉDITIONS**, 15, rue Malebranche, 75005 Paris.

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

**ISBN** EDP Sciences 978-2-7598-0561-7

**ISBN** CNRS ÉDITIONS 978-2-271-07601-4

# Préface

La mécanique des fluides a une longue histoire, mais elle reste un sujet jeune avec des découvertes récentes et de nombreuses applications qui touchent à la vie courante. Cette histoire est un défilé de grands noms de la Science : au XVIII<sup>e</sup> siècle les Bernoulli, Euler, Lagrange ; au XIX<sup>e</sup>, Cauchy, Navier, Stokes, Helmholtz, Rayleigh, Reynolds, et Lamb ; au XX<sup>e</sup> Couette, Prandtl, G.I. Taylor et Kolmogorov entre autres.

Dans l'environnement naturel, nous pouvons nous fier aux prévisions météorologiques à cinq jours et aux alertes sur les tornades ; la réussite de longue date du calcul des marées s'étend aujourd'hui à la prédiction des tsunamis ; la connaissance des circulations océaniques et atmosphériques est appliquée à des problèmes tels que la pollution, le trou d'ozone et les changements climatiques. À l'intérieur de la Terre, la mécanique des fluides joue un rôle crucial dans la convection du manteau, les volcans et leurs nuages de poussière, les gisements pétrolifères ainsi que pour l'évaluation de la possibilité de séquestrer le CO<sub>2</sub>.

La mécanique des fluides joue aussi un rôle clé dans nombre d'industries : la conception des avions est partie d'idées simples au début du XX<sup>e</sup> siècle pour aboutir à la fin du siècle au développement d'ailes à faible traînée équipées d'ailettes et de fuselages améliorés. Dans le même temps, le bruit des réacteurs a été réduit de façon spectaculaire grâce au principe du double flux : une turbine concentrique de grand diamètre crée un écoulement froid masquant le jet rapide central. Des fluides simples ou complexes sont utilisés pour produire du verre et d'autres matériaux, ainsi que dans le génie chimique et les industries agroalimentaires.

Récemment, les chercheurs en mécanique des fluides se sont intéressés à la microfluidique qui permet de multiples analyses simultanées d'un petit échantillon biologique, ainsi qu'à l'impression à jet d'encre où le mouillage intervient sur des distances très petites, à la conception de bâtiments à haute efficacité énergétique impliquant la convection naturelle et au contrôle des instabilités et de la turbulence.

Une telle profusion d'idées et d'applications pose un défi quant à l'enseignement du sujet. Certaines notions doivent être réservées à des cours spécialisées de Masters. Mais l'enseignement de base doit aider les étudiants à progresser vers des sujets plus avancés, présents et futurs.

Les auteurs de ce livre ont adopté, à mon sens, l'approche et le style qui intéresseront et formeront les étudiants, les préparant ainsi pour le futur. Je crains que certaines des autres approches risquent fort d'échouer de ce point de vue. Ainsi, certains cours de formation d'ingénieurs dépendent trop fortement des simulations numériques, ce qui n'est pas sans risque dans le cas d'applications nouvelles. Les enseignements de caractère plus mathématique se heurtent souvent à des difficultés considérables en cherchant à prouver si les équations gouvernant les systèmes étudiés ont ou n'ont pas de solution, même dans le cas apparemment simple de l'équation de Navier Stokes (un des problèmes non résolus du prix Clay). L'approche de ce livre est ancrée dans les expériences et la réalité concrète. La structure de la présentation choisie guidera les lecteurs vers une vision en profondeur des sujets abordés.

Le domaine de la mécanique des fluides a, à mon avis, largement bénéficié au cours de ces trente dernières années des contributions des physiciens français tels que les auteurs de ce livre : ils ont apporté une approche renouvelée du sujet, des techniques expérimentales nouvelles, un sens des aspects pratiques et une ouverture vers les disciplines scientifiques voisines. Ce livre est un témoignage de cette dynamique.

John Hinch  
Professeur à l'Université de Cambridge  
Fellow de Trinity College

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Physique des fluides</b>	<b>1</b>
1.1 L'état liquide . . . . .	1
1.1.1 Les différents états de la matière : systèmes modèles et milieux réels . . . . .	2
1.1.2 La limite solide-liquide : une frontière parfois floue . . .	7
1.2 Coefficients macroscopiques de transport . . . . .	8
1.2.1 Conductivité thermique . . . . .	9
1.2.2 Diffusion de masse . . . . .	17
1.3 Modèles microscopiques des coefficients de transport . . . . .	19
1.3.1 La marche au hasard . . . . .	19
1.3.2 Coefficients de transport des gaz parfaits . . . . .	22
1.3.3 Phénomènes de transport diffusif dans les liquides . . .	27
1.4 Effets de surface et tension superficielle . . . . .	29
1.4.1 La tension superficielle . . . . .	29
1.4.2 Forces de pression associées à la tension superficielle . .	32
1.4.3 Étalement de gouttes sur une surface – notion de mouillage . . . . .	34
1.4.4 Influence de la gravité . . . . .	36
1.4.5 Quelques méthodes de mesure de la tension superficielle	41
1.4.6 Instabilité de Rayleigh-Taylor . . . . .	43
1.5 Diffusion de rayonnements dans les fluides . . . . .	46
1.5.1 Quelques sondes de la structure des liquides . . . . .	46
1.5.2 Diffusion élastique et inélastique . . . . .	48
1.5.3 La diffusion élastique et quasi élastique de la lumière : un outil d'étude de la structure et du transport diffusif dans les liquides . . . . .	52
1.5.4 Diffusion inélastique de la lumière dans les liquides . . .	55
1.6 Coefficients de transport de fluides . . . . .	59

<b>2</b>	<b>Transport de la quantité de mouvement et régimes d'écoulement</b>	<b>61</b>
2.1	Transports diffusif et convectif de quantité de mouvement dans les écoulements . . . . .	62
2.1.1	Diffusion et convection de la quantité de mouvement : deux expériences illustratives . . . . .	62
2.1.2	Transport de quantité de mouvement dans un écoulement de cisaillement – introduction de la viscosité . . . . .	64
2.2	Modèles microscopiques de la viscosité . . . . .	68
2.2.1	Viscosité des gaz . . . . .	68
2.2.2	Viscosité des liquides . . . . .	70
2.2.3	Simulation numérique des trajectoires de molécules dans un écoulement . . . . .	73
2.3	Comparaison entre les mécanismes de diffusion et de convection	74
2.3.1	Le nombre de Reynolds . . . . .	74
2.3.2	Transports convectif et diffusif de masse ou d'énergie thermique . . . . .	76
2.4	Description de différents régimes d'écoulement . . . . .	79
2.4.1	Écoulements dans un tube cylindrique : l'expérience de Reynolds . . . . .	80
2.4.2	Écoulement derrière un cylindre . . . . .	80
2.4.3	Écoulement derrière une sphère . . . . .	83
<b>3</b>	<b>Cinématique des fluides</b>	<b>85</b>
3.1	Description du mouvement d'un fluide . . . . .	85
3.1.1	Échelles de longueur et hypothèse de continuité . . . . .	85
3.1.2	Descriptions eulérienne et lagrangienne du mouvement d'un fluide . . . . .	86
3.1.3	Accélération d'une particule de fluide . . . . .	87
3.1.4	Lignes et tubes de courant, trajectoires, lignes d'émission	89
3.2	Déformations dans les écoulements . . . . .	90
3.2.1	Décomposition des variations du champ de vitesse au voisinage d'un point . . . . .	91
3.2.2	Composante symétrique du tenseur des taux de déformation : déformation pure . . . . .	92
3.2.3	Composante antisymétrique du tenseur des taux de déformation : rotation pure . . . . .	96
3.2.4	Application . . . . .	98
3.2.5	Cas des grandes déformations . . . . .	100
3.3	Conservation de la masse dans un fluide en écoulement . . . . .	101
3.3.1	Équation de conservation de la masse . . . . .	102
3.3.2	Condition d'incompressibilité d'un fluide . . . . .	103
3.3.3	Écoulements rotationnels ; écoulements potentiels . . . . .	105

- 3.4 Fonction de courant . . . . . 106
  - 3.4.1 Introduction et signification de la fonction de courant 106
  - 3.4.2 Fonctions de courant d'écoulements plans . . . . . 108
  - 3.4.3 Fonctions de courant des écoulements axisymétriques . . 111
- 3.5 Visualisations et mesures de vitesse et de gradient
  - de vitesse dans les écoulements . . . . . 113
  - 3.5.1 Visualisation des écoulements . . . . . 113
  - 3.5.2 Mesures de concentrations . . . . . 117
  - 3.5.3 Quelques méthodes de mesure de la vitesse locale
    - d'un fluide . . . . . 118
  - 3.5.4 Mesures de champ de vitesse d'écoulements
    - et de gradients de vitesse . . . . . 121
- 4 Dynamique des fluides visqueux, rhéologie, écoulements parallèles 125**
  - 4.1 Forces de surface . . . . . 125
    - 4.1.1 Expression générale des forces de surface. Contraintes dans un fluide . . . . . 125
    - 4.1.2 Caractéristiques du tenseur des contraintes de viscosité 128
    - 4.1.3 Tenseur des contraintes de viscosité pour un fluide newtonien . . . . . 130
  - 4.2 Équation du mouvement d'un fluide . . . . . 132
    - 4.2.1 Équation de la dynamique d'un fluide dans le cas général . . . . . 132
    - 4.2.2 Équation de Navier-Stokes du mouvement d'un fluide newtonien . . . . . 134
    - 4.2.3 Équation d'Euler pour un fluide parfait . . . . . 135
    - 4.2.4 Forme adimensionnelle de l'équation de Navier-Stokes 135
  - 4.3 Conditions aux limites dans les écoulements fluides . . . . . 136
    - 4.3.1 Conditions aux limites à la surface d'un corps solide . . 136
    - 4.3.2 Conditions aux limites entre deux fluides – effet de la tension superficielle . . . . . 138
  - 4.4 Les fluides non newtoniens . . . . . 140
    - 4.4.1 Mesures des caractéristiques rhéologiques . . . . . 140
    - 4.4.2 Fluides non newtoniens indépendants du temps . . . . . 142
    - 4.4.3 Différents types de fluides dépendant du temps . . . . . 147
    - 4.4.4 Élasticité et viscosité complexes des fluides viscoélastiques . . . . . 150
    - 4.4.5 Anisotropie des contraintes normales . . . . . 155
    - 4.4.6 Viscosité élongationnelle . . . . . 157
    - 4.4.7 Résumé des principaux types de fluides non Newtoniens 158
  - 4.5 Écoulements unidirectionnels de fluides visqueux newtoniens . . 159
    - 4.5.1 Équation de Navier-Stokes pour les écoulements unidirectionnels . . . . . 159



4.5.2	Écoulement de Couette entre deux plans parallèles . . .	161
4.5.3	Écoulements de Poiseuille . . . . .	162
4.5.4	Écoulements oscillants dans un fluide visqueux . . . . .	167
4.5.5	Écoulement parallèle créé par une variation horizontale de densité . . . . .	173
4.5.6	Écoulement de Couette cylindrique . . . . .	175
4.6	Écoulements unidirectionnels simples de fluides non newtoniens indépendants du temps . . . . .	179
4.6.1	Écoulement stationnaire de Couette plan . . . . .	179
4.6.2	Écoulement unidirectionnel avec des parois fixes . . . . .	180
4.6.3	Profils de vitesse pour des lois rhéologiques simples . . . . .	182
4.6.4	Écoulement d'un fluide viscoélastique près d'un plan oscillant . . . . .	186
<b>5</b>	<b>Équations de bilan</b>	<b>191</b>
5.1	Équation de bilan de masse . . . . .	191
5.2	Bilan de quantité de mouvement . . . . .	192
5.2.1	Expression locale . . . . .	192
5.2.2	Forme intégrale de l'équation de bilan de quantité de mouvement . . . . .	193
5.3	Bilan d'énergie cinétique – équation de Bernoulli . . . . .	198
5.3.1	Équation de bilan d'énergie cinétique dans un fluide incompressible en écoulement avec ou sans viscosité . . . . .	198
5.3.2	Relation de Bernoulli . . . . .	201
5.3.3	Applications de l'équation de Bernoulli . . . . .	204
5.4	Applications des équations de bilan de quantité de mouvement et d'énergie . . . . .	210
5.4.1	Jet incident sur un plan . . . . .	210
5.4.2	Jet sortant d'un réservoir par un orifice . . . . .	212
5.4.3	Force sur les parois d'une conduite de révolution de section variable . . . . .	215
5.4.4	Couches liquides d'épaisseur variable – ressaut hydraulique . . . . .	216
<b>6</b>	<b>Écoulements potentiels</b>	<b>225</b>
6.1	Introduction . . . . .	225
6.2	Définitions, propriétés et exemples d'écoulements potentiels . . . . .	227
6.2.1	Caractéristiques et exemples de potentiels de vitesse . . . . .	227
6.2.2	Unicité du potentiel des vitesses . . . . .	228
6.2.3	Potentiels des vitesses des écoulements élémentaires et combinaison des fonctions potentielles . . . . .	231
6.2.4	Exemple d'écoulements potentiels simples . . . . .	237
6.3	Forces sur un obstacle dans un écoulement potentiel . . . . .	246
6.3.1	Cas bidimensionnel . . . . .	247

- 6.3.2 Effets de masse ajoutée pour un corps tridimensionnel accéléré dans un fluide parfait . . . . . 251
- 6.4 Ondes linéaires à la surface d'un fluide parfait . . . . . 256
  - 6.4.1 Houle, risée et déferlantes . . . . . 256
  - 6.4.2 Trajectoires des particules de fluide lors du passage de l'onde . . . . . 260
  - 6.4.3 Ondes solitaires . . . . . 261
  - 6.4.4 Un autre écoulement potentiel avec interface : la bulle de Taylor . . . . . 263
- 6.5 Analogie électrique des écoulements potentiels bidimensionnels 264
  - 6.5.1 Analogie directe . . . . . 265
  - 6.5.2 Analogie inverse . . . . . 265
- 6.6 Potentiel complexe des vitesses . . . . . 267
  - 6.6.1 Définition du potentiel complexe . . . . . 267
  - 6.6.2 Potentiel complexe de quelques écoulements . . . . . 268
  - 6.6.3 La transformation conforme . . . . . 271

**7 Vorticité, dynamique du tourbillon, écoulements en rotation**

**283**

- 7.1 La vorticité : définition, exemple des filaments de tourbillons rectilignes . . . . . 284
  - 7.1.1 Notion de vorticité . . . . . 284
  - 7.1.2 Un modèle simple de tourbillon rectiligne : le vortex de Rankine . . . . . 285
  - 7.1.3 Analogies avec l'électromagnétisme . . . . . 290
- 7.2 Dynamique de la circulation de la vitesse d'écoulement . . . . . 295
  - 7.2.1 Le théorème de Kelvin : conservation de la circulation . 295
  - 7.2.2 Sources de circulation . . . . . 299
- 7.3 Dynamique de la vorticité . . . . . 306
  - 7.3.1 Équation de transport de la vorticité et conséquences . 306
  - 7.3.2 Équilibre étirement-diffusion . . . . . 311
- 7.4 Exemples de répartition de vorticité concentrée sur des lignes singulières . . . . . 313
  - 7.4.1 Vorticité concentrée sur des lignes . . . . . 313
  - 7.4.2 Dynamique d'un ensemble de lignes de vorticité rectilignes parallèles . . . . . 314
  - 7.4.3 Anneaux tourbillons . . . . . 322
- 7.5 Tourbillons, vorticité et locomotion dans l'air et dans l'eau . . . 326
  - 7.5.1 Forces de poussée et émission de tourbillons . . . . . 326
  - 7.5.2 Portance et sustentation . . . . . 328
  - 7.5.3 Portance et propulsion . . . . . 330
- 7.6 Fluides en rotation . . . . . 332
  - 7.6.1 Mouvement d'un fluide dans un repère en rotation . . . 333
  - 7.6.2 Écoulements à petit nombre de Rossby . . . . . 339

7.6.3	Ondes dans les fluides en rotation . . . . .	345
7.6.4	Effet de la viscosité au voisinage de parois : couche d'Ekman . . . . .	356
7.7	Vorticité, rotation et écoulements secondaires . . . . .	360
7.7.1	Écoulements secondaires dus à la courbure de canalisations ou de canaux à surface libre . . . . .	360
7.7.2	Écoulements secondaires dans des mouvements transitoires . . . . .	363
7.7.3	Écoulements secondaires associés à des effets de couches d'Ekman . . . . .	366
<b>8</b>	<b>Écoulements quasi parallèles – Approximation de lubrification</b>	<b>373</b>
8.1	Approximation de lubrification . . . . .	373
8.1.1	Écoulements quasi parallèles . . . . .	373
8.1.2	Hypothèses de l'approximation de lubrification . . . . .	374
8.1.3	Effets d'instationnarité . . . . .	377
8.1.4	Équations de mouvement dans l'approximation de lubrification . . . . .	378
8.1.5	Un exemple d'application de l'équation de lubrification : écoulement stationnaire entre deux plans mobiles formant un angle faible . . . . .	378
8.1.6	Écoulements d'un film fluide de profil d'épaisseur quelconque . . . . .	383
8.1.7	Écoulement entre deux cylindres de rayons voisins décentrés . . . . .	387
8.1.8	Lubrification et rugosité des surfaces . . . . .	390
8.2	Écoulements de films liquides à surface libre – hydrodynamique du mouillage . . . . .	392
8.2.1	Dynamique des films liquides minces sans effets de la tension superficielle . . . . .	392
8.2.2	Angles de contact dynamiques . . . . .	394
8.2.3	Dynamique de l'étalement de gouttes sur une surface plane . . . . .	399
8.2.4	Écoulements induits par des gradients de la tension superficielle – effet Marangoni . . . . .	403
8.3	Chute d'un jet liquide cylindrique . . . . .	408
8.3.1	Régime d'écoulement stable . . . . .	409
8.3.2	Effets capillaires et instabilité de Rayleigh-Plateau du jet . . . . .	412
<b>9</b>	<b>Écoulements à petit nombre de Reynolds</b>	<b>417</b>
9.1	Les écoulements à petit nombre de Reynolds . . . . .	418
9.1.1	Sens physique du nombre de Reynolds . . . . .	418
9.1.2	Exemples d'écoulements à petit nombre de Reynolds . . . . .	418

- 9.1.3 Quelques caractéristiques marquantes . . . . . 420
- 9.2 Équation du mouvement à petit nombre de Reynolds . . . . . 421
  - 9.2.1 Équation de Stokes . . . . . 421
  - 9.2.2 Quelques formes équivalentes de l'équation de Stokes . . 422
  - 9.2.3 Propriétés des solutions de l'équation de Stokes . . . . . 423
  - 9.2.4 Prédiction dimensionnelles sur les écoulements  
à petit nombre de Reynolds . . . . . 432
- 9.3 Forces et moments s'exerçant sur un solide en mouvement . . . 434
  - 9.3.1 Linéarité des relations entre la vitesse d'un solide  
et les forces exercées . . . . . 435
  - 9.3.2 Influence des propriétés de symétrie des solides  
sur les forces et les moments appliqués . . . . . 436
  - 9.3.3 Propulsion aux faibles nombres de Reynolds . . . . . 441
- 9.4 Déplacement d'une sphère dans un fluide visqueux . . . . . 443
  - 9.4.1 Champ de vitesse autour d'une sphère en mouvement . 443
  - 9.4.2 Force exercée sur une sphère en mouvement  
dans un fluide – coefficient de traînée . . . . . 447
  - 9.4.3 Extensions de la résolution de l'équation  
de Stokes à d'autres problèmes . . . . . 451
- 9.5 Limites de la description de Stokes des écoulements  
à faible nombre de Reynolds . . . . . 458
  - 9.5.1 Équation d'Oseen . . . . . 458
  - 9.5.2 Forces sur un cylindre circulaire infini  
dans un écoulement uniforme ( $Re \ll 1$ ) . . . . . 461
- 9.6 Dynamique des suspensions . . . . . 463
  - 9.6.1 Rhéologie des suspensions . . . . . 464
  - 9.6.2 Sédimentation d'une suspension de particules . . . . . 467
- 9.7 Écoulements dans les milieux poreux . . . . . 469
  - 9.7.1 Quelques exemples . . . . . 469
  - 9.7.2 Paramètres caractérisant un milieu poreux . . . . . 470
  - 9.7.3 Écoulements dans les milieux poreux saturés –  
loi de Darcy . . . . . 473
  - 9.7.4 Modèles simples de la perméabilité  
des matériaux poreux . . . . . 479
  - 9.7.5 Relations conductivité électrique –  
perméabilité des poreux . . . . . 481
  - 9.7.6 Écoulement de fluides non miscibles dans les milieux  
poreux . . . . . 484
- 10 Transports couplés. Couches limites laminaires . . . . . 491**
  - 10.1 Introduction . . . . . 492
  - 10.2 Structure de la couche limite près d'une plaque plane  
dans un écoulement uniforme . . . . . 493

10.3	Équations de mouvement dans la couche limite – théorie de Prandtl . . . . .	495
10.3.1	Équations de mouvement près d'une plaque plane . . . . .	495
10.3.2	Transport de vorticité dans la couche limite . . . . .	498
10.3.3	Autosimilarité des profils de vitesse dans la couche limite pour une vitesse extérieure uniforme et constante	498
10.4	Profils de vitesse dans les couches limites . . . . .	501
10.4.1	équation de Blasius pour un écoulement extérieur uniforme . . . . .	501
10.4.2	Profil de vitesse solution de l'équation de Blasius . . . . .	502
10.4.3	Force de frottement sur une plaque plane dans un écoulement uniforme . . . . .	504
10.4.4	épaisseurs de couche limite . . . . .	505
10.4.5	Stabilité hydrodynamique d'une couche limite laminaire – Couches limites turbulentes . . . . .	507
10.5	Couche limite laminaire en présence d'un gradient de pression externe : décollement des couches limites . . . . .	508
10.5.1	Analyse physique simplifiée du problème . . . . .	508
10.5.2	Profils de vitesse autosimilaires – �coulements de la forme $U(x) = Cx^m$ . . . . .	508
10.5.3	Couches limites d'épaisseur constante . . . . .	512
10.5.4	écoulements non autosimilaires – décollement de la couche limite . . . . .	514
10.5.5	Conséquences pratiques du décollement des couches limites . . . . .	515
10.6	Aérodynamique et couches limites . . . . .	516
10.6.1	Contrôle de couche limite sur l'aile d'avion . . . . .	516
10.6.2	Aérodynamique automobile . . . . .	519
10.6.3	Aérodynamique d'autres véhicules terrestres . . . . .	522
10.6.4	Contrôle actif et réactif de la traînée ou de la portance .	523
10.7	Sillage et jet laminaire . . . . .	524
10.7.1	équation de mouvement du sillage . . . . .	524
10.7.2	Force de traînée sur un corps – relation avec la vitesse dans le sillage . . . . .	528
10.7.3	Jet laminaire à deux dimensions . . . . .	531
10.8	Couches limites thermiques et massiques . . . . .	532
10.8.1	Couches limites thermiques . . . . .	532
10.8.2	Couches limites de concentration, polarographie . . . . .	538
10.8.3	Dispersion de Taylor . . . . .	546
10.9	Flammes . . . . .	550
10.9.1	Flammes, mélange et réactions chimiques . . . . .	551
10.9.2	Flammes de diffusion laminaires . . . . .	553
10.9.3	Flammes prémélangées . . . . .	556
10.9.4	Instabilité d'une flamme plane de prémélange . . . . .	561

<b>11 Instabilités hydrodynamiques</b>	<b>563</b>
11.1 Une approche globale des instabilités : le modèle de Landau . . .	564
11.1.1 Un modèle expérimental simple d'instabilité mécanique	564
11.1.2 Écoulement autour d'un cylindre au voisinage du seuil d'émission de tourbillons . . . . .	567
11.1.3 Évolution temporelle des instabilités dans le modèle de Landau . . . . .	568
11.2 Instabilité de Rayleigh-Bénard . . . . .	573
11.2.1 Équations de transport thermique convectif . . . . .	573
11.2.2 Stabilité d'une couche fluide en présence d'un gradient vertical de température . . . . .	574
11.2.3 Description de l'instabilité de Rayleigh-Bénard . . . . .	575
11.2.4 Mécanisme de l'instabilité de Rayleigh-Bénard et ordres de grandeur . . . . .	575
11.2.5 Solution bidimensionnelle du problème de Rayleigh-Bénard . . . . .	579
11.2.6 Modèle de Landau appliqué à la convection de Rayleigh Bénard . . . . .	585
11.2.7 Évolution vers la turbulence au-dessus du seuil de convection . . . . .	586
11.3 Autres exemples d'instabilités fermées . . . . .	587
11.3.1 Instabilité thermocapillaire de Bénard-Marangoni . . . . .	587
11.3.2 Instabilité de Taylor-Couette . . . . .	592
11.3.3 Autres instabilités centrifuges . . . . .	595
11.4 Instabilités d'écoulements ouverts . . . . .	596
11.4.1 Instabilité de Kelvin-Helmholtz . . . . .	597
11.4.2 Rôle de la forme du profil de vitesse des écoulements ouverts . . . . .	604
11.4.3 Instabilités sous-critiques des écoulements de Poiseuille et de Couette . . . . .	606
<b>12 Turbulence</b>	<b>609</b>
12.1 Une longue histoire . . . . .	610
12.2 Les équations de base . . . . .	611
12.2.1 Description statistique des écoulements turbulents . . .	611
12.2.2 Dérivation des valeurs moyennes . . . . .	613
12.2.3 Équations du mouvement des écoulements turbulents . .	613
12.2.4 Bilans d'énergie dans un écoulement turbulent . . . . .	617
12.2.5 Transport de la vorticité dans un écoulement turbulent	619
12.3 Expressions empiriques du tenseur de Reynolds et applications aux écoulements libres . . . . .	621
12.3.1 Fermeture de l'équation de Reynolds . . . . .	621
12.3.2 Viscosité turbulente . . . . .	622
12.3.3 Longueur de mélange . . . . .	622

12.3.4	Autres approches pratiques de la turbulence . . . . .	625
12.4	Écoulements turbulents libres : jets, sillages . . . . .	625
12.4.1	Propriétés de base des jets et sillages turbulents bidimensionnels . . . . .	626
12.4.2	Champs de vitesse autosimilaires dans les jets et sillages bidimensionnel . . . . .	630
12.4.3	Jets et sillages turbulents tridimensionnels axisymétriques . . . . .	634
12.5	Écoulements près d'une paroi solide . . . . .	634
12.5.1	Propriétés qualitatives des écoulements turbulents en présence d'une paroi . . . . .	634
12.5.2	Écoulements turbulents stationnaires parallèles à une paroi plane . . . . .	636
12.5.3	Écoulement turbulent entre deux plaques parallèles . . .	639
12.5.4	Pertes de charge et coefficient de frottement pour des écoulements entre plans parallèles et dans des tubes . . . . .	645
12.5.5	Couches limites turbulentes . . . . .	648
12.5.6	Décollement des couches limites turbulentes . . . . .	652
12.6	Turbulence homogène – théorie de Kolmogorov . . . . .	655
12.6.1	<i>Cascade d'énergie</i> dans un écoulement turbulent homogène . . . . .	655
12.6.2	Expression spectrale des lois de Kolmogorov . . . . .	660
12.6.3	Vérification expérimentale de la théorie de Kolmogorov	666
12.7	Autres aspects de la turbulence . . . . .	666
12.7.1	Intermittence de la turbulence . . . . .	667
12.7.2	Structures cohérentes turbulentes . . . . .	667
12.7.3	Dynamique des tourbillons en turbulence bidimensionnelle . . . . .	669
	<b>Références bibliographiques</b>	<b>671</b>
	<b>Index</b>	<b>683</b>
	<b>Cahier couleurs</b>	

# Introduction

Cette troisième édition d'*Hydrodynamique physique* arrive dix ans après une précédente qui, elle-même, avait élargi l'édition originale parue dix ans plus tôt. Nous nous sommes efforcés de conserver l'esprit qui nous avait guidés alors, issu de notre expérience d'enseignants en Université et en Grande École : le titre « Hydrodynamique Physique » de l'ouvrage reflète notre souci de présenter la mécanique des fluides en donnant une large place aux observations et analyses physiques tout en évitant les développements mathématiques trop lourds. Les arguments dimensionnels ou d'ordres de grandeur y occupent une large place. L'iconographie a été renouvelée et s'est enrichie d'un cahier central en couleurs, favorisant ainsi une approche inductive plus directe des phénomènes étudiés.

Nous nous sommes attachés à ce que ce livre reste utilisable pour un enseignement de licence et au-delà. Certains sujets traités dans le livre complètent des notions fondamentales et peuvent être, en ce sens, considérés comme des exercices d'application. Mais ce livre s'adresse également à tous les scientifiques, pas seulement physiciens, s'intéressant aux applications de la mécanique des fluides : cela nous a conduit à l'enrichir par des exemples issus des sciences de la nature et de la vie courante.

La mécanique des fluides a un statut mal défini. Elle apparaît comme une branche directe des sciences physiques aux États-Unis, où la Division de Dynamique des Fluides de l'*American Physical Society* organise la plus importante rencontre annuelle au monde sur le sujet. En France, au contraire, elle a été longtemps plus proche des mathématiques appliquées, tout en entretenant une relation forte avec les sciences de l'ingénieur. Une tradition, qui remonte aux grands noms de la mécanique française du XIX<sup>e</sup> siècle, Cauchy, Poisson, Navier, Darcy... explique cette tendance. Il en est résulté pendant longtemps une ignorance mutuelle entre mécaniciens et physiciens, ces derniers étant également très ignorants de la science des fluides réels. Une raison annexe de cette méconnaissance de la mécanique par les physiciens est venue de la polarisation compréhensible de la physique du XX<sup>e</sup> siècle tournée vers des problèmes tels que la relativité, la mécanique quantique, tout en oubliant que les pères de ces disciplines avaient aussi une excellente maîtrise de la mécanique. Ainsi nous voyons apparaître le nom d'Einstein dans l'étude des suspensions en relation avec le mouvement brownien ; de même, la thèse de



Heisenberg portait sur la turbulence, sujet auquel il s'intéressera de nouveau en 1945...

Les années 1980 ont vu se développer une vision nouvelle des instabilités et de la transition vers la turbulence : des physiciens tels que P. Bergé, S. Fauve, A. Libchaber, B. Perrin, Y. Pomeau et J.E. Wesfreid en France et G. Ahlers, J. Gollub et H. Swinney aux États-Unis (entre autres) y ont largement contribué.

Dans les décennies qui ont suivi, la méconnaissance mutuelle des mécaniciens et physiciens s'est encore atténuée grâce aux contributions foisonnantes de jeunes scientifiques associant les deux types de formation initiale. Notre livre, à travers ses précédentes versions, a pu jouer un rôle modeste dans cette évolution.

Au-delà de notre formation initiale de physiciens, nous avons appris la mécanique des fluides « sur le tas » à travers des travaux expérimentaux sur les superfluides, les instabilités hydrodynamiques, les cristaux liquides, les milieux poreux et les suspensions ; nous avons également revisité des problèmes classiques de la mécanique des fluides en mettant en place des instrumentations physiques nouvelles. Plus généralement, les recherches expérimentales en mécanique des fluides ont largement bénéficié de nouvelles méthodes d'acquisition et de traitement de données et d'images et de l'utilisation de lasers. Enfin, les approches théoriques développées pour traiter certains problèmes physiques fondamentaux (comme les phénomènes critiques) ont trouvé des débouchés importants en mécanique des fluides.

Dans les premiers chapitres de l'ouvrage, nous avons tout d'abord voulu donner les bases nécessaires pour aborder des problèmes spécifiques.

Le *chapitre 1* rappelle quelques notions sur la structure des fluides et leurs propriétés microscopiques, sur les méthodes spectroscopiques qui permettent de les étudier et sur les phénomènes d'interfaces à prendre en compte dans les écoulements à surface libre.

Le *chapitre 2* introduit la notion de viscosité et les différents régimes d'écoulement des fluides, souvent liés au nombre de Reynolds caractérisant la nature convective ou diffusive du transport dans ces écoulements.

Les *chapitres 3* et *4* discutent les champs de vitesse d'écoulement ainsi que les déformations des particules de fluide (cinématique) et les contraintes qui leur sont associées (dynamique). Nous étudions des fluides newtoniens ou non suivant la relation contrainte-déformation qui est vérifiée. Les équations de mouvement des fluides qui ont été établies alors sont appliquées à quelques géométries d'écoulement simples.

Le *chapitre 5* discute les équations de bilan des fluides. Celles-ci sont souvent des formes intégrales des relations établies au chapitre 4 et elles permettent de résoudre de nombreux problèmes sans avoir à connaître les champs de vitesses locaux.

Le *chapitre 6* traite de l'écoulement des fluides parfaits et est un prolongement naturel des équations de bilan. Dans ces écoulements, le rotationnel de

la vitesse est souvent nul en tous points, ce qui permet des analogies directes avec l'électrostatique.

Le *chapitre 7* est la charnière du livre : il introduit la notion clé de vorticité (la dernière brique de base de la mécanique des fluides), puis l'applique aux tourbillons où cette vorticité est très localisée dans un « coeur ». Le chapitre se prolonge par le problème étroitement lié des écoulements en rotation, crucial notamment pour les écoulements terrestres à grande échelle.

La suite du livre aborde des problèmes plus spécifiques :

Le *chapitre 8* décrit quelques écoulements quasi-parallèles dominés par la viscosité et décrits dans l'approximation de « lubrification » : celle-ci est riche d'applications aux écoulements de films liquides minces à surface libre ou non et aux jets liquides libres.

Le *chapitre 9* s'intéresse aux écoulements contrôlés par la viscosité à cause de leur faible nombre de Reynolds et non de leur géométrie seulement comme ceux de lubrification. Leurs nombreuses applications telles que la locomotion de microorganismes, la dynamique des suspensions, les écoulements dans les milieux poreux sont présentées.

Le *chapitre 10* traite les transports couplés associant convection et diffusion et faisant intervenir plusieurs échelles de longueur. La couche limite décrit ainsi la zone de transition entre une vitesse nulle sur une paroi et un écoulement potentiel extérieur et s'applique largement en aérodynamique. Nous étendons ensuite cette approche aux sillages et aux jets ainsi qu'aux réactions électrochimiques et aux flammes.

Les instabilités hydrodynamiques sont abordées *au chapitre 11*, tant à partir de l'approche globale du modèle de Landau qu'à l'échelle du champ de vitesse local à partir de solutions approchées. Quelques instabilités convectives confinées sont d'abord étudiées en dégageant des notions telles que les instabilités sous critiques avant de passer à des exemples d'instabilités d'écoulements ouverts.

Enfin, *le chapitre 12* traite les écoulements turbulents, dominés par les mouvements aléatoires du fluide. Après les écoulements libres (jets ou sillages) puis en présence de parois, nous décrivons le transfert d'énergie dans la turbulence homogène avant d'évoquer la turbulence bidimensionnelle.

Comme nous l'avons dit, notre approche physique est issue de nos travaux sur des problèmes de mécanique des fluides. Nos contacts avec une communauté internationale très accueillante à nos approches de physiciens ont fait le reste. En particulier, nous voulons rendre hommage à l' cole britannique de mécanique des fluides : les cours de E.J. Hinch qui nous fait le grand honneur de préfacer ce livre et de K.H. Moffatt nous ont ainsi ouverts à une présentation de la mécanique associant théorie, expérience et une solide part de pragmatisme. Il ne faudrait bien sûr pas oublier les quatre volumes des articles de G.I. Taylor et le livre classique de G.K. Batchelor (ainsi que nos contacts directs avec lui).

Aux États-Unis, nos contacts avec des personnalités comme A. Acrivos, J. Brady, G. Homsy, J. Koplik, L. Mahadevan et H. Stone (entre autres), ont élargi notre vision vers des problèmes très divers. Enfin, nous avons découvert de nombreux phénomènes de mécanique des fluides à travers la remarquable série de films du NCFMF (National Committee for Fluid Mechanics Films); ceux ci ont trouvé un prolongement sous une forme actuelle et de nombreuses extensions dans le projet Multimedia Fluid Mechanics animé par G. Homsy.

En France, une École des Houches organisée en 1973 par J.L. Peube avec K. Moffatt, S. Orszag, P. Germain a suscité, pour P.G. de Gennes qui y participait comme élève, deux années de cours très originaux au Collège de France et, pour l'un d'entre nous (EG), le projet du présent livre.

Mais, avant tout, en plus de nos enseignements, c'est dans la vie quotidienne des laboratoires de notre communauté que ce livre s'est construit. Les recherches et enseignements de P. Bergé, B. Castaing, C. Clanet, Y. Couder, M. Farge, M. Fermigier, P. Gondret, E. Guazzelli, J.F. Joanny, F. Moisy, B. Perrin, Y. Pomeau, M. Rabaud, D. Salin, J.E. Wesfreid et bien d'autres sont ainsi à l'origine de nombreux éléments de ce livre; nous remercions tous ces collègues.

Nous souhaitons enfin remercier tout spécialement plusieurs collègues qui nous ont généreusement aidé dans la rédaction de plusieurs parties de cet ouvrage : J.L. Aider (aérodynamique appliquée), C. Allain (écoulements non newtoniens), A. Ambari (polarographie), A.M. Cazabat (dynamique du mouillage), M. Champion (flames), C. Clanet (capillarité), F. Moisy (turbulence et écoulements en rotation), C. Nore (magnétohydrodynamique), N. Ribe (jets libres), H. Swinney (instabilités) et J. Teixeira (diffusion de rayonnements dans les fluides).

# Chapitre 1

## Physique des fluides

À une échelle microscopique, la physique des fluides peut être considérée comme une branche de la thermodynamique. L'approche physique classique s'intéresse aux états d'équilibre des corps purs – solides, liquides et gaz – et aux changements d'état entre ces phases. Un premier élargissement de cette approche est l'étude des fluctuations au voisinage immédiat d'un état d'équilibre ; ces fluctuations sont caractéristiques de cet état, mais renseignent aussi sur les propriétés de retour à l'équilibre. Ainsi, pour un système physique contenant un grand nombre de particules et qui a subi un « léger écart » par rapport à son état d'équilibre thermodynamique, il existe des relations simples de proportionnalité entre les flux, qui ramènent le système à l'équilibre et l'importance de l'écart par rapport à cet équilibre.

L'étude de ces relations et la définition des coefficients de transport qui les caractérisent constituent le noyau de ce premier chapitre ; cette étude sera d'abord macroscopique (section 1.2), puis microscopique (section 1.3). Nous analyserons ensuite (section 1.4) quelques phénomènes de surface qui apparaissent lorsque deux fluides ont une surface de séparation commune (interface). Nous discuterons enfin brièvement l'application aux liquides des techniques de spectroscopie optique, de rayons X ou de neutrons (section 1.5) : ces méthodes permettent d'étudier les fluctuations autour de l'équilibre et d'en déduire les valeurs des coefficients de transport. Mais, tout d'abord (section 1.1), nous allons donner une description simple de l'état microscopique d'un fluide en nous attachant à analyser l'influence de ses caractéristiques microscopiques sur ses propriétés macroscopiques.

### 1.1 L'état liquide

On connaît bien, à partir de l'étude des structures microscopiques (rayons X) ou par l'observation de la forme extérieure d'un cristal, l'organisation périodique de ses atomes. Dans cet état de la matière, les atomes

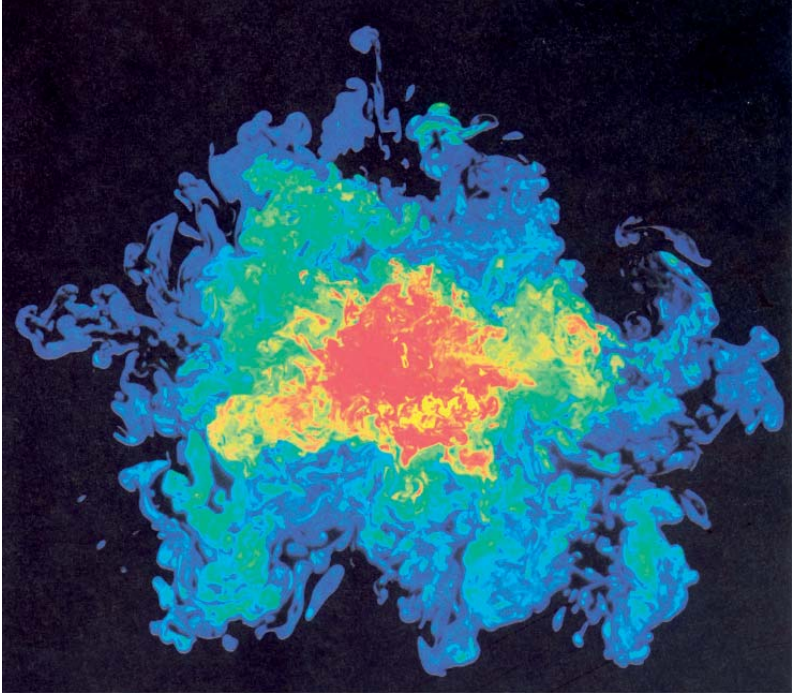


FIG. 12.2 – (a) Vue en coupe d'un jet turbulent éclairé par un plan lumineux perpendiculaire à son axe et injecté dans un volume du même fluide. Le jet contient un colorant fluorescent tandis que le fluide extérieur est pur. Les couleurs indiquent la concentration en colorant, croissante du bleu vers le rouge (doc. H.E. Catrakis et P.E. Dimotakis).

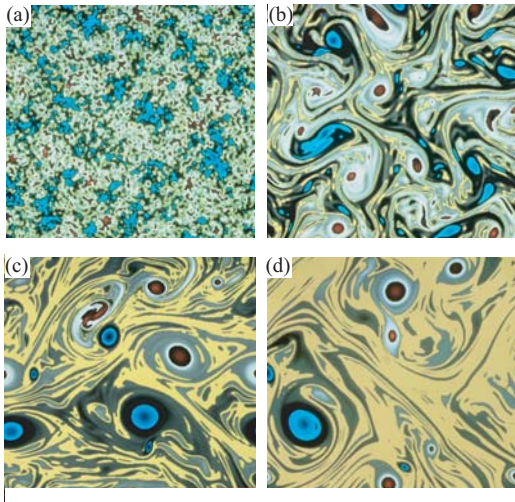


FIG. 12.19 – Simulation numérique de l'évolution temporelle d'une distribution de vorticité, initialement aléatoire dans un écoulement turbulent à deux dimensions, et évoluant ensuite sans apport d'énergie extérieure. Le code de couleurs représentant le champ de vorticité est : rouge pour les valeurs fortement positives, bleu pour les valeurs fortement négatives, gris pour les valeurs faibles et jaune pour la valeur nulle). Les images (a); (b); (c); (d) correspondent respectivement à des temps normalisés  $t = 0$ ,  $t = 1$ ,  $t = 3$ ,  $t = 5$  (docs. M. Farge et J-F. Colonna).

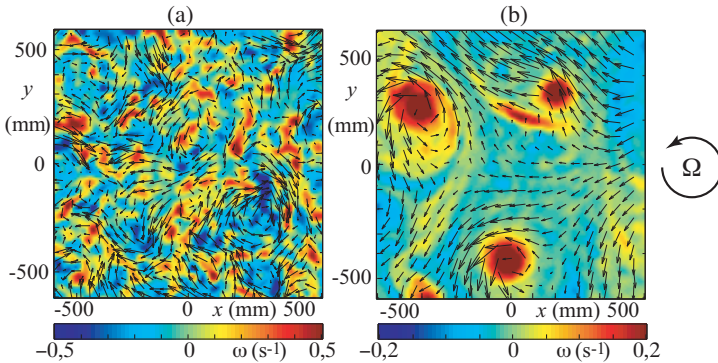


FIG. 12.20 – Distribution de la vorticité dans une cuve en rotation à une vitesse angulaire  $\Omega$  (1 tour toutes les 30 s) autour d'un axe vertical perpendiculaire au plan de figure après : (a) 2 tours, (b) 10 tours. L'écoulement turbulent a été créée par le déplacement d'une grille perpendiculairement au plan de figure. La vorticité est indiquée par le code de couleurs et le champ de vitesse par les vecteurs. Les zones de vorticité cyclonique (en rouge) correspondent à une rotation locale de même sens que celle imposée ; les zones de vorticité anticyclonique de signe opposé sont en bleu (docs. F. Moisy, C. Morize, M. Rabaud et J. Sommeria).