

# 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
<b>4</b>	<b>Dynamique des fluides visqueux, rhéologie, écoulements parallèles</b>	<b>125</b>
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'�lectromagn�tisme . . . . .	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	Prédictions 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
<b>10</b>	<b>Transports couplés. Couches limites laminaires</b>	<b>491</b>
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</b>	<b>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</b>	<b>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>	