

Table des matières

Introduction	xiii
1 Physique des fluides	1
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

2	Transport de la quantité de mouvement et régimes d'écoulement	61
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
3	Cinématique des fluides	85
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
5	Équations de bilan	191
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
6	Écoulements potentiels	225
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
8	Écoulements quasi parallèles – Approximation de lubrification	373
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
9	Écoulements à petit nombre de Reynolds	417
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
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

11	Instabilités hydrodynamiques	563
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
12	Turbulence	609
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
	Références bibliographiques	671
	Index	683
	Cahier couleurs	