

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 |  quation 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 |  paisseurs 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 |  coulements 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 |  quation 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 | |