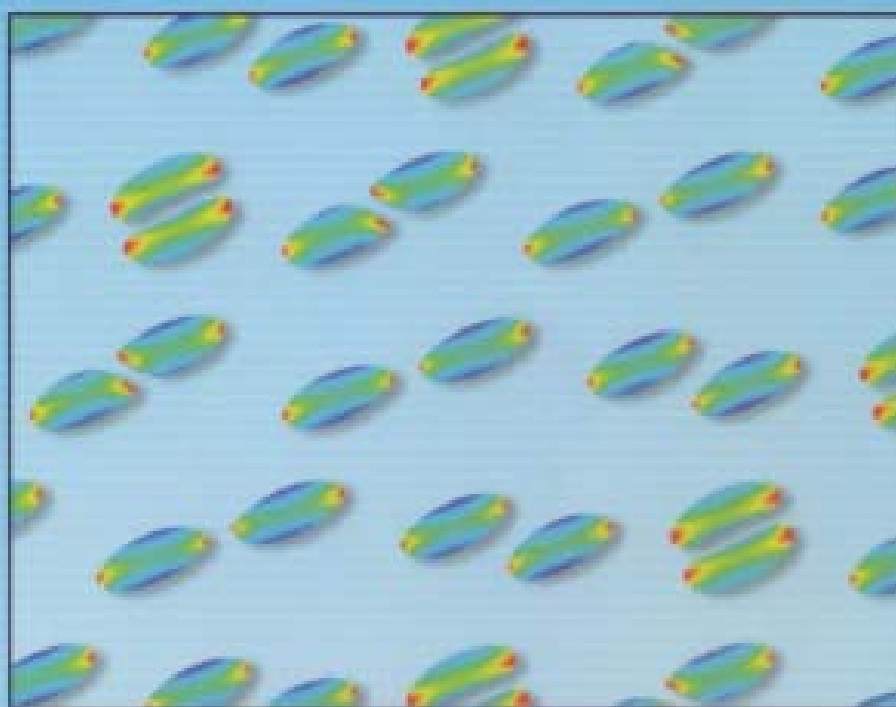


Dominique Barthès-Biesel

Microhydrodynamique et fluides complexes



LES ÉDITIONS DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Table des matières

Avant-propos	3
1 Principes fondamentaux	15
1.1 Conservation de la masse	16
1.2 Équation du mouvement	16
1.3 Le fluide newtonien	17
1.4 Équations de Navier-Stokes	18
1.5 Dissipation d'énergie	18
1.6 Analyse dimensionnelle	20
2 Écoulements de Stokes	23
2.1 Équations de Stokes stationnaires	23
2.1.1 Relation pression-vitesse	24
2.1.2 Relation pression-vorticité	24
2.2 Problème simple d'écoulement de Stokes	25
2.3 Linéarité et réversibilité	26
2.4 Unicité	27
2.5 Minimum de dissipation de l'énergie	28

2.6	Théorème de réciprocité	30
2.7	Solutions harmoniques	31
2.8	Exercices	33
2.8.1	Dissipation d'énergie d'une particule solide	33
2.8.2	Symétrie de l'écoulement de Stokes	34
3	Écoulements de Stokes bi-dimensionnels	35
3.1	Fonction de courant	36
3.1.1	Coordonnées cartésiennes	36
3.1.2	Coordonnées cylindriques	37
3.2	Équation de Stokes bi-dimensionnelle	38
3.3	Dièdre à paroi mobile	39
3.3.1	Champ de vitesse	39
3.3.2	Champ de pression	42
3.3.3	Efforts sur le couteau	42
3.3.4	Autres problèmes à parois mobiles	43
3.4	Écoulements dans les dièdres fixes	44
3.4.1	Valeurs réelles de λ ($2\alpha > 146.3^\circ$)	46
3.4.2	Valeurs imaginaires de λ ($2\alpha < 146.3^\circ$)	47
3.5	Exercices	51
3.5.1	Fermeture d'un dièdre	51
3.5.2	Écoulement dans une cavité infinie	52
3.5.3	Écoulement au voisinage d'un point d'arrêt sur une paroi	53
4	Écoulements de lubrification	55

4.1	Écoulements de lubrification 2D	56
4.1.1	Ordres de grandeur et approximations	57
4.1.2	Champ de vitesse	58
4.1.3	Conservation de la masse	59
4.1.4	Équation de Reynolds 2D	59
4.1.5	Exemple : le patin hydraulique	60
4.2	Écoulement de lubrification 3D	63
4.2.1	Équation de Reynolds 3D	63
4.2.2	Exemple : écrasement d'une goutte	65
4.3	Écoulements confinés entre des parois fixes	67
4.3.1	Écoulement de Hele-Shaw	67
4.3.2	Écoulement dans des circuits microfluidiques	69
4.4	Écoulement dans les milieux poreux	71
4.4.1	Définition géométrique d'un milieu poreux	72
4.4.2	Écoulement dans un milieu poreux	73
4.5	Exercices	76
4.5.1	Lubrification d'un coussinet de palier	76
4.5.2	Écoulement dans un milieu poreux	78
4.5.3	Écoulement de lubrification le long d'une paroi poreuse	80
4.5.4	Mouvement d'un cylindre entre deux plaques planes	83
5	Écoulements de films à surface libre	89
5.1	Interface entre deux fluides non miscibles	90
5.1.1	Conditions cinématiques	91
5.1.2	Conditions dynamiques : loi de Laplace	91

5.1.3	Interface air-liquide	92
5.2	Étalement gravitationnel d'un liquide	92
5.2.1	Étalement sans tension de surface	93
5.2.2	Effet de la tension interfaciale	96
5.3	Stabilité d'un film sur un plan incliné	97
5.4	Exercices	100
5.4.1	Étalement d'une nappe bi-dimensionnelle alimentée	100
5.4.2	Écoulement thermo-capillaire dans une cavité	102
5.4.3	Mouvement d'une lentille de contact sur l'œil	105
6	Mouvement d'une particule solide	111
6.1	Mouvement d'une particule solide	112
6.1.1	Tenseurs de résistance et de mobilité	113
6.1.2	Relations entre les tenseurs de résistance et de mobilité	114
6.1.3	Translation sans rotation	116
6.1.4	Rotation sans translation	116
6.2	Particules isotropes	117
6.3	Écoulement autour d'une sphère en translation	119
6.3.1	Fonction de courant	120
6.3.2	Champs de vitesse et de vorticité	121
6.3.3	Efforts sur la sphère	122
6.3.4	Lignes de courant	124
6.4	Écoulement autour d'une sphère en rotation	124
6.5	Particules élancées	126
6.5.1	Fibres	126

6.5.2	Hélices	127
6.6	Exercices	129
6.6.1	Sédimentation d'une particule ayant un plan de symétrie	129
6.6.2	Nage des sphères et des bactéries	131
6.6.3	Propulsion d'un micro-organisme par un flagelle	135
6.6.4	Particule dans un écoulement quelconque	149
7	Mouvement de bulles et gouttes	145
7.1	Goutte liquide en suspension	146
7.1.1	Formulation générale du problème	146
7.1.2	Analyse dimensionnelle	147
7.2	Bulle de gaz en translation	148
7.2.1	Équations du problème	148
7.2.2	Solution à l'aide d'une fonction de courant	149
7.2.3	Forme de la bulle	150
7.3	Goutte liquide en translation	151
7.3.1	Force de traînée d'Hadamard-Rybczynski	151
7.3.2	Stabilité de la solution de Stokes	153
7.3.3	Limites de de la solution de Stokes	153
7.4	Exercices	156
7.4.1	Mouvement thermo-capillaire d'une bulle de gaz	156
7.4.2	Électro-hydrodynamique d'une goutte liquide	160
8	Solutions générales des équations de Stokes	165
8.1	Écoulement dû à une force ponctuelle	166

8.1.1	Définition d'un stokeslet	166
8.1.2	Propriétés du stokeslet	168
8.1.3	Correspondance avec l'écoulement autour d'une sphère	169
8.1.4	Solutions dérivées du stokeslet	170
8.2	Solutions irrotationnelles	172
8.3	Solutions fondamentales	173
8.3.1	Singularités pour problèmes extérieurs	173
8.3.2	Singularités pour problèmes intérieurs	174
8.3.3	Exemple : bulle de gaz en translation	177
8.3.4	Applications de la méthode des singularités	179
8.4	Formulation intégrale	179
8.4.1	Vitesse d'un point de $\mathcal{D}$	180
8.4.2	Vitesse sur la frontière $\partial\mathcal{D}$	181
8.4.3	Principe de la méthode intégrale	182
8.4.4	Mouvement d'une particule solide	183
8.4.5	Applications des méthodes intégrales	184
8.5	Exercices	187
8.5.1	Goutte liquide en translation dans un fluide au repos	187
8.5.2	Sphère rigide dans un écoulement de cisaillement	188
8.5.3	Écoulement autour d'une particule rigide : forme intégrale	191
8.5.4	Écoulement autour d'une particule liquide : forme intégrale	193
9	Dynamique des suspensions	195
9.1	Homogénéisation d'une suspension	196
9.2	Relation micro-macro	198

9.3	Suspension diluée	200
9.3.1	Suspension diluée de sphères identiques	200
9.3.2	Suspension diluée de particules anisotropes	201
9.3.3	Approximation $O(c^2)$ de la viscosité d'une suspension de sphères	203
9.4	Suspension de sphères très concentrée	204
9.5	Modélisation numérique d'une suspension	205
9.5.1	Matrices globales de résistance et de mobilité	207
9.5.2	Application à une suspension de sphères	208
9.6	Conclusion	210
9.7	Exercices	212
9.7.1	Interaction hydrodynamique entre trois sphères	212
9.7.2	Loi de comportement d'une suspension de sphères	216
9.7.3	Convection intrinsèque dans une suspension	218
10	Correction $O(Re)$ à la solution de Stokes	225
10.1	Sphère en translation : correction d'Oseen	225
10.2	Cylindre en translation	228
10.3	Limite de validité de l'approximation de Stokes	230
10.4	Exercice	232
10.4.1	Évaluation du nombre de Reynolds	232
11	Fluides non-newtoniens	235
11.1	Introduction	236
11.2	Hydrodynamique d'un fluide non-newtonien	237
11.2.1	Équations du mouvement	237

11.2.2	Formulation de lois de comportement	238
11.2.3	Fonctions viscométriques sous cisaillement simple	239
11.3	Fluide non newtonien purement visqueux	242
11.3.1	Fluide de Reiner-Rivlin	242
11.3.2	Fluide à contrainte seuil	244
11.4	Fluide visco-élastique	245
11.4.1	Déformations relatives	246
11.4.2	Loi de comportement générale	247
11.5	Lois visco-élastiques linéaires	248
11.5.1	Fluide de Maxwell	248
11.5.2	Fluide de Maxwell généralisé	250
11.5.3	Loi visco-élastique linéaire : formes intégrales	251
11.6	Lois visco-élastiques non linéaires	252
11.6.1	Lois intégrales non linéaires	252
11.6.2	Lois différentielles non linéaires	254
11.7	Exemples d'écoulements	255
11.7.1	Écoulement stationnaire entre deux plaques parallèles	255
11.7.2	Écoulement oscillatoire d'un fluide visco-élastique	260
11.8	Conclusion	262
11.9	Exercices	263
11.9.1	Écoulement d'une huile lourde en conduite cylindrique	263
11.9.2	Effet Weissenberg	265

A Notation indicielle	275
A.1 Notation des vecteurs et tenseurs	275
A.2 Convention de sommation d'Einstein	276
A.3 Intégration sur une sphère	276
Chapitre 1	
B Coordonnées curvilignes	279
B.1 Coordonnées cylindriques	279
B.2 Coordonnées sphériques	282
Index	285