

# Table des matières

Préface de la première édition	xiii
Avant-propos	xv
Remerciements	xvii
<b>1 Généralités sur le comportement rhéologique des matériaux</b>	<b>1</b>
1.1 Solide élastique hookéen et fluide visqueux newtonien . . . . .	5
1.1.1 Loi de Hooke . . . . .	5
1.1.2 Loi de Newton . . . . .	6
1.2 Solide plastique et fluide visqueux non newtonien . . . . .	7
1.2.1 Réponse à l'action soudaine d'un cisaillement (régime transitoire) . . . . .	9
1.2.2 Comportement sous cisaillement continu (régime permanent) . . . . .	11
1.3 Thixotropie et antithixotropie . . . . .	16
1.4 Les fluides à seuil . . . . .	18
1.4.1 Définition . . . . .	18
1.4.2 Les fluides à seuil de type 1 . . . . .	18
1.4.3 Les fluides à seuil de type 2 . . . . .	20
1.4.4 Cas des solides cristallins à haute température . . . . .	22
1.5 Fluides viscoélastiques . . . . .	24
1.5.1 Le modèle de Maxwell : description qualitative . . . . .	24
1.5.2 Exemples de fluides viscoélastiques de Maxwell . . . . .	28
1.5.3 Le modèle de Jeffrey . . . . .	31
1.5.4 Énergie dissipée . . . . .	33
1.5.5 Énergie élastique emmagasinée . . . . .	35
1.5.6 Contraintes élastiques, forces normales et effet Weissenberg . . . . .	37
1.5.7 Quelques manifestations macroscopiques des contraintes élastiques . . . . .	39
1.6 Les solides viscoélastiques . . . . .	41
1.7 Les cristaux liquides . . . . .	45

<b>2</b>	<b>Rappels de mécanique des milieux continus</b>	<b>55</b>
2.1	Tenseur des contraintes et des couples surfaciques . . . . .	56
2.1.1	Forces et couples de surface . . . . .	56
2.1.2	Construction du tenseur des contraintes . . . . .	58
2.1.3	Construction du tenseur des couples surfaciques . . . . .	59
2.2	Lois de conservation . . . . .	60
2.2.1	Loi de conservation de la masse . . . . .	60
2.2.2	Loi de conservation de la quantité de mouvement . . . . .	61
2.3	Équation d'équilibre des couples et symétrie du tenseur des contraintes . . . . .	62
2.4	Production irréversible d'entropie et lois de comportement . . . . .	64
<b>3</b>	<b>Hydrodynamique des liquides newtoniens</b>	<b>67</b>
3.1	Loi de comportement rhéologique et loi de Fourier . . . . .	69
3.1.1	Bilans d'énergie et d'entropie . . . . .	69
3.1.2	Tenseur des coefficients de viscosité dans le cas d'un liquide isotrope . . . . .	71
3.1.3	Interprétation macroscopique de la viscosité de cisaillement . . . . .	72
3.1.4	Calcul microscopique de la viscosité de cisaillement . . . . .	74
3.2	Équations de l'hydrodynamique . . . . .	80
3.2.1	Équation de conservation de la masse . . . . .	81
3.2.2	Équation de conservation de la quantité de mouvement (Navier-Stokes) . . . . .	81
3.2.3	Conditions aux limites . . . . .	82
3.2.4	Équation de la chaleur . . . . .	84
3.2.5	Vitesse du son et nombre de Mach . . . . .	89
3.2.6	Théorème de la dissipation : force et couple de frottement visqueux sur un solide en mouvement . . . . .	92
3.2.7	Équation de la vortacité . . . . .	94
3.3	Nombre de Reynolds . . . . .	96
3.3.1	Définition : notion d'écoulements semblables . . . . .	96
3.3.2	Signification physique du nombre de Reynolds . . . . .	97
3.3.3	Stabilité des écoulements et nombre de Reynolds critique . . . . .	98
3.4	Couche limite et sillage : l'exemple de la ligne source de vortacité . . . . .	101
3.5	Écoulements à grands nombres de Reynolds : l'approximation du fluide parfait . . . . .	103
3.5.1	Théorème de Bernoulli . . . . .	103
3.5.2	Théorème de la circulation de Kelvin . . . . .	105
3.5.3	Écoulements irrotationnels (ou potentiels) . . . . .	105
3.6	La théorie de la couche limite . . . . .	119
3.6.1	Les équations de Prandtl . . . . .	119
3.6.2	Étude qualitative du décollement . . . . .	121

3.6.3	Profil de Blasius . . . . .	123
3.6.4	Équation de Falker-Skan . . . . .	126
3.6.5	Équation intégrale de la couche limite . . . . .	127
3.6.6	Couche limite thermique . . . . .	129
3.7	Écoulements aux faibles nombres de Reynolds . . . . .	131
3.7.1	Unicité et additivité . . . . .	132
3.7.2	Réversibilité . . . . .	132
3.7.3	Dissipation minimale . . . . .	132
3.7.4	Théorème de réciprocité . . . . .	133
3.7.5	Théorie de la lubrification . . . . .	133
3.7.6	Étalement d'un liquide sur un plateau en rotation (« spin-coating ») . . . . .	137
3.7.7	Formule de Stokes . . . . .	138
3.7.8	Migration thermocapillaire d'une goutte . . . . .	143
3.7.9	Propagation des micro-organismes . . . . .	147
3.7.10	Écoulement de Poiseuille et milieu poreux . . . . .	151
3.7.11	Instabilité de Saffman-Taylor . . . . .	154
3.8	Mesure de la viscosité . . . . .	165
3.8.1	Rhéomètres rotatifs . . . . .	165
3.8.2	Rhéomètre capillaire . . . . .	170
3.8.3	Rhéomètre piézoélectrique . . . . .	172
3.8.4	Machine de force . . . . .	174
3.8.5	Sur le glissement aux parois . . . . .	177
3.8.6	Mesure des viscosités en conditions extrêmes . . . . .	179
3.8.7	Mesure de la viscosité de volume . . . . .	180
3.8.8	Mesure des viscosités en géophysique . . . . .	181
3.8.9	Conséquences des effets de température et de pression sur les mesures de viscosité . . . . .	182
<b>4</b>	<b>Élasticité des solides</b> . . . . .	<b>185</b>
4.1	Élastostatique des solides durs usuels . . . . .	187
4.1.1	Tenseur des déformations . . . . .	187
4.1.2	Tenseur des contraintes . . . . .	190
4.1.3	Thermodynamique de la déformation . . . . .	200
4.1.4	Loi de Hooke . . . . .	201
4.1.5	L'équation de Navier . . . . .	208
4.1.6	Comment résoudre un problème d'élasticité . . . . .	208
4.1.7	Principe de Saint-Venant . . . . .	209
4.1.8	Théorèmes généraux . . . . .	210
4.1.9	Application à quelques problèmes simples . . . . .	211
4.1.10	Instabilité de flambage d'une poutre . . . . .	224
4.1.11	Instabilité de flottement d'une aile d'avion . . . . .	229
4.2	Élastodynamique des solides durs usuels . . . . .	234
4.2.1	Ondes en milieu infini . . . . .	235
4.2.2	Ondes en milieu fini . . . . .	236

4.2.3	Ondes de surface de Rayleigh . . . . .	238
4.2.4	Ondes émises par un tremblement de terre et sismologie . . . . .	240
4.2.5	Mesure des constantes élastiques et application en géophysique . . . . .	243
4.3	Élasticité des cristaux colloïdaux . . . . .	245
4.3.1	Généralités sur les cristaux colloïdaux . . . . .	245
4.3.2	Mesures des modules élastiques . . . . .	251
<b>5</b>	<b>Défauts dans les solides cristallins</b>	<b>259</b>
5.1	Défauts ponctuels . . . . .	261
5.1.1	Exemples : lacunes, interstitiels et impuretés . . . . .	261
5.1.2	Concentration d'équilibre de lacunes . . . . .	262
5.1.3	Lacunes et diffusion de matière . . . . .	264
5.2	Dislocations . . . . .	267
5.2.1	Construction de Volterra . . . . .	268
5.2.2	Définition précise du vecteur de Burgers et règle des nœuds . . . . .	269
5.2.3	Mise en évidence expérimentale des dislocations . . . . .	271
5.2.4	Propriétés élastiques des dislocations . . . . .	275
5.2.5	Force de Peach et Koehler sur une dislocation . . . . .	288
5.2.6	Interactions entre dislocations . . . . .	290
5.2.7	Multiplication des dislocations . . . . .	296
5.2.8	Glissement des dislocations . . . . .	301
5.2.9	Glissement dévié et montée des dislocations . . . . .	314
5.3	Parois . . . . .	316
5.3.1	Description topologique et propriétés statiques . . . . .	316
5.3.2	Mouvement d'une paroi sous contrainte . . . . .	327
5.3.3	Complexions et thermodynamique des joints de grains . . . . .	330
<b>6</b>	<b>Limite d'élasticité des solides cristallins</b>	<b>333</b>
6.1	Contrainte interne . . . . .	334
6.2	Friction de réseau . . . . .	334
6.3	Croisement entre dislocations : durcissement par la forêt . . . . .	341
6.3.1	Analyse topologique du croisement entre deux dislocations . . . . .	342
6.3.2	Conséquences directes de la formation des crans . . . . .	343
6.3.3	Cas des jonctions attractives . . . . .	345
6.3.4	Cas des jonctions répulsives . . . . .	346
6.4	Durcissement par les joints de grains : loi de Hall et Petch . . . . .	347
6.5	Durcissement par alliage . . . . .	352
6.5.1	Durcissement en présence de précipités cohérents : modèles de Mott et Nabarro et de Friedel . . . . .	353
6.5.2	Durcissement en présence de précipités incohérents : mo- dèle d'Orowan . . . . .	357

6.5.3	Durcissement des solutions solides : modèles de Mott et Nabarro, de Friedel et de Labusch . . . . .	360
6.5.4	Nuages de Cottrell et bandes de Lüders . . . . .	367
6.6	Durcissement par trempe . . . . .	375
6.7	Durcissement par irradiation . . . . .	375
<b>7</b>	<b>Écoulement plastique des solides cristallins</b>	<b>377</b>
7.1	Courbes de fluage à contrainte fixée : lois d'Andrade . . . . .	379
7.2	Relation d'Orowan . . . . .	380
7.3	Quelques modèles classiques de plasticité . . . . .	382
7.3.1	Fluage à basse température par glissement de dislocations . . . . .	382
7.3.2	Fluage à haute température . . . . .	386
7.3.3	Cartes des mécanismes de déformation d'Ashby . . . . .	398
7.4	Courbes de déformation à vitesse de déformation fixée . . . . .	399
7.4.1	Allure générale . . . . .	400
7.4.2	Modélisation de « <i>l'overshoot</i> » . . . . .	400
7.4.3	Instabilité de Portevin-Le Chatelier . . . . .	403
7.5	Acoustique et avalanches de dislocations . . . . .	406
7.6	Plasticité des cristaux colloïdaux et fusion sous cisaillement . . . . .	411
<b>8</b>	<b>Plasticité des solides amorphes</b>	<b>417</b>
8.1	Exemples de verres et applications . . . . .	418
8.2	Volume libre et relaxation structurale . . . . .	420
8.3	Densification sous pression hydrostatique . . . . .	420
8.4	Preuves expérimentales de la plasticité des verres . . . . .	421
8.5	Le régime d'écoulement plastique homogène . . . . .	424
8.6	Le régime élastique et la limite d'élasticité apparente . . . . .	428
8.7	Le régime de déformation inhomogène . . . . .	430
8.7.1	La courbe de déformation . . . . .	430
8.7.2	Analyse des différents régimes . . . . .	431
8.7.3	Sur l'origine des bandes de cisaillement . . . . .	434
8.7.4	Les bandes sont-elles chaudes ou froides ? . . . . .	435
<b>9</b>	<b>Rupture des solides</b>	<b>441</b>
9.1	Rappels sur les modes de rupture . . . . .	442
9.2	Rupture fragile et rupture ductile : définition . . . . .	443
9.3	Analyse de Hart de l'instabilité de striction . . . . .	445
9.4	La température de transition fragile-ductile . . . . .	446
9.4.1	Définition . . . . .	446
9.4.2	Détermination expérimentale . . . . .	447
9.4.3	Un peu d'histoire . . . . .	450
9.5	Théorie de la rupture fragile « idéale » . . . . .	450
9.5.1	Contrainte de clivage théorique . . . . .	450
9.5.2	Rupture par propagation de fissure : critère de Griffith . . . . .	452

9.5.3	Vitesse de propagation d'une fissure . . . . .	457
9.6	Vérification expérimentale de la théorie de Griffith . . . . .	462
9.6.1	Le cas d'école du verre de vitre . . . . .	462
9.6.2	Cas du zinc polycristallin . . . . .	463
9.6.3	Cas de l'acier . . . . .	466
9.7	Rupture fragile en présence de plasticité . . . . .	466
9.7.1	Zone plastique et champ de contrainte . . . . .	466
9.7.2	Généralisation du critère de Griffith . . . . .	468
9.7.3	Intégrale $J$ . . . . .	468
9.7.4	Diagramme d'Ashby pour la ténacité et la limite d'élasticité . . . . .	471
9.8	Fracture ductile . . . . .	471
9.9	Approche statistique de la rupture : effets de taille . . . . .	475
<b>10</b>	<b>Rhéologie des matériaux isotropes viscoélastiques : aspects macroscopiques</b>	<b>479</b>
10.1	Régime linéaire et régime non linéaire . . . . .	481
10.2	Viscoélasticité linéaire et écoulements oscillants . . . . .	483
10.2.1	Modèle de Maxwell (liquides viscoélastiques) . . . . .	483
10.2.2	Cas d'un cisaillement oscillatoire à la fréquence $f = \omega/2\pi$	496
10.2.3	Tenseur des contraintes complet : modules de cisaillement $G(t)$ et de compressibilité $K(t)$ . . . . .	503
10.2.4	Modèle de Kelvin-Voigt (solides viscoélastiques) . . . . .	506
10.2.5	Mesure des fonctions de la viscoélasticité linéaire $G'(\omega)$ et $G''(\omega)$ . . . . .	508
10.3	Viscoélasticité non linéaire et écoulements continus . . . . .	512
10.3.1	Tenseur des contraintes sous cisaillement simple . . . . .	513
10.3.2	Première et seconde différences de contraintes normales $N_1$ et $N_2$ : coefficients de contraintes normales $\Psi_1$ et $\Psi_2$	515
10.3.3	Quelques manifestations expérimentales des contraintes normales . . . . .	516
10.3.4	Profil des vitesses et stabilité de l'écoulement de Couette	522
10.3.5	Écoulement de Poiseuille . . . . .	524
10.3.6	Mesure des fonctions viscométriques $\eta$ , $\Psi_1$ et $\Psi_2$ . . . . .	526
10.3.7	Écoulements élongationnels . . . . .	528
10.4	Calcul des fonctions viscométriques et lien avec les fonctions de viscoélasticité linéaire . . . . .	530
10.4.1	Les insuffisances du modèle linéaire de Maxwell . . . . .	531
10.4.2	Transport convectif d'un vecteur et tenseur de Finger . . . . .	532
10.4.3	Tenseur de Cauchy . . . . .	536
10.4.4	Généralisation de l'équation de Maxwell et calcul des fonctions viscométriques à l'aide du tenseur de Finger . . . . .	537
10.4.5	Les modèles de Jeffrey convectés (ou « d'Oldroyd-A ou B »)	544
10.4.6	Généralisation en régime non linéaire des modèles de Jeffrey convectés (ou d'Oldroyd-A ou B) . . . . .	547

10.4.7	Autre classe de modèles . . . . .	552
10.4.8	Formules empiriques de Cox et Merz et de Laun . . . . .	555
10.5	Principe de superposition « temps-température » . . . . .	556
10.6	Doigt de Saffman-Taylor dans les fluides complexes . . . . .	558
10.6.1	Loi de Darcy dans un fluide visqueux rhéofluidifiant . . . . .	559
10.6.2	Sélection d'un doigt de Saffman-Taylor dans un fluide visqueux rhéofluidifiant . . . . .	560
10.6.3	Doigts de Saffman-Taylor dans les liquides viscoélastiques ou à seuil . . . . .	564
<b>11</b>	<b>Rhéologie des matériaux isotropes viscoélastiques : exemples et théories microscopiques</b>	<b>565</b>
11.1	Les polymères fondus . . . . .	567
11.1.1	Généralités sur les polymères . . . . .	568
11.1.2	Quelques exemples de polymères . . . . .	570
11.1.3	Comportement rhéologique des polymères fondus . . . . .	576
11.1.4	Rappels sur la théorie des polymères . . . . .	584
11.1.5	Expression microscopique du tenseur des contraintes . . . . .	589
11.1.6	Le modèle de Rouse dans les polymères non enchevêtrés . . . . .	590
11.1.7	Modèle de Doi-Edwards dans les polymères enchevêtrés . . . . .	602
11.2	Un exemple d'élastomère de la famille des solides viscoélastiques : le caoutchouc vulcanisé . . . . .	610
11.2.1	Définition d'un élastomère . . . . .	611
11.2.2	Modules de Young et de cisaillement d'un élastomère . . . . .	612
11.3	Les polymères en solution semi-diluée . . . . .	615
11.3.1	Généralités sur les polymères en solution . . . . .	615
11.3.2	Application du modèle de Doi-Edwards . . . . .	622
11.4	Les polymères « vivants » : l'exemple des micelles géantes des solutions de surfactant . . . . .	624
11.4.1	Comment fabriquer des micelles géantes . . . . .	624
11.4.2	Comportement rhéologique . . . . .	626
11.4.3	Thermodynamique de l'agrégation . . . . .	629
11.4.4	Passage du régime dilué au régime semi-dilué . . . . .	630
11.4.5	Le régime semi-dilué . . . . .	632
11.4.6	Prédictions des fonctions de viscoélasticité linéaire $G'$ et $G''$ et de la viscosité $\eta_0$ . . . . .	632
11.5	Les dispersions . . . . .	636
11.5.1	Les suspensions colloïdales de particules solides . . . . .	636
11.5.2	Les émulsions . . . . .	657
11.6	Les solutions diluées de polymères . . . . .	668
11.6.1	Quelques résultats de viscoélasticité linéaire . . . . .	669
11.6.2	Le modèle de Zimm . . . . .	670

<b>12 Rhéologie des fluides à seuil</b>	<b>677</b>
12.1 Critère d'écoulement de von Mises . . . . .	679
12.2 Mesure de la contrainte seuil . . . . .	679
12.2.1 Plan incliné . . . . .	679
12.2.2 Sédimentation . . . . .	681
12.2.3 Montée capillaire . . . . .	682
12.2.4 Spin coating . . . . .	684
12.2.5 Étalement d'un tas . . . . .	685
12.3 Les fluides à seuil de type 1 . . . . .	688
12.3.1 Définition . . . . .	688
12.3.2 Comportement général . . . . .	688
12.3.3 Exemples . . . . .	690
12.3.4 Lois de comportement empiriques . . . . .	690
12.3.5 Comportement sous cisaillement alternatif . . . . .	692
12.3.6 Comportement sous cisaillement continu . . . . .	696
12.3.7 Écoulement de Poiseuille en tube cylindrique . . . . .	702
12.3.8 Modèle micromécanique . . . . .	706
12.4 Les fluides à seuil de type 2 . . . . .	711
12.4.1 Définition . . . . .	711
12.4.2 Comportement général . . . . .	711
12.4.3 Exemples . . . . .	714
12.4.4 Loi rhéologique semi-empirique . . . . .	716
12.4.5 Comportement sous cisaillement alternatif . . . . .	717
12.4.6 Comportement sous cisaillement continu . . . . .	720
12.5 Hystérésis rhéologique . . . . .	725
12.5.1 Le cas des fluides à seuil de type 2 . . . . .	726
12.5.2 Le cas des fluides à seuil de type 1 . . . . .	729
12.6 Le modèle de Coussot et Ovarlez . . . . .	730
12.7 Modélisation d'un fluide à seuil . . . . .	732
12.7.1 Un exemple simple de modèle $\lambda$ . . . . .	733
12.7.2 Vers une généralisation des modèles $\lambda$ . . . . .	741
<b>13 Rhéologie des fluides rhéoépaississants</b>	<b>745</b>
13.1 Quelques résultats expérimentaux . . . . .	747
13.1.1 Rhéoépaississement continu (CST) . . . . .	747
13.1.2 Rhéoépaississement discontinu (DST) . . . . .	748
13.1.3 Blocage dynamique (SJ) . . . . .	751
13.2 Facteurs influençant le rhéoépaississement . . . . .	752
13.2.1 Facteurs géométriques . . . . .	753
13.2.2 Paramètres physico-chimiques . . . . .	758
13.2.3 Autres paramètres . . . . .	761
13.2.4 En résumé . . . . .	763
13.3 Modélisation . . . . .	763
13.3.1 Le modèle historique d'Hoffman . . . . .	763
13.3.2 Le modèle des « hydroclusters » de Bossis et Brady . . . . .	765

13.3.3	Le modèle de la transition frictionnelle . . . . .	768
13.3.4	Le modèle de Jamali et Brady . . . . .	780
13.3.5	Commentaire sur les mesures de contrainte normale . . . . .	783
13.4	Preuves expérimentales de l'existence de frottement solide et d'une transition frictionnelle . . . . .	784
13.4.1	Retour sur les expériences d'inversion du taux de cisaillement . . . . .	784
13.4.2	Autres preuves de la transition frictionnelle et mesures à l'échelle microscopique . . . . .	786
13.5	Cas des suspensions cohésives et frictionnelles . . . . .	791
13.6	Rôle d'une friction au roulement . . . . .	793
13.7	Généralisation du modèle WC . . . . .	794
<b>14</b>	<b>Rhéologie des cristaux liquides</b>	<b>797</b>
14.1	Nématodynamique . . . . .	799
14.1.1	L'expérience de Grupp : mise en évidence des couples élastiques . . . . .	800
14.1.2	L'élasticité nématique . . . . .	802
14.1.3	L'instabilité de Fréedericksz . . . . .	807
14.1.4	Sur le scintillement de la phase nématique . . . . .	814
14.1.5	L'expérience de Miesowicz . . . . .	816
14.1.6	Construction de la nématodynamique . . . . .	818
14.1.7	Calcul des modes propres de fluctuation du directeur . . . . .	824
14.1.8	Écoulement de Couette . . . . .	825
14.1.9	Écoulement de Poiseuille . . . . .	838
14.1.10	Écoulement unidirectionnel induit par le « backflow » . . . . .	839
14.1.11	Viscoélasticité de la phase nématique . . . . .	842
14.1.12	Lignes de disinclinaison . . . . .	846
14.1.13	Nématiques chiraux . . . . .	865
14.1.14	Nématiques actifs . . . . .	883
14.2	Smectodynamique . . . . .	889
14.2.1	L'expérience de Bartolino et Durand : mise en évidence des contraintes élastiques . . . . .	889
14.2.2	L'élasticité smectique . . . . .	891
14.2.3	L'instabilité d'ondulation des couches . . . . .	896
14.2.4	L'instabilité d'Helfrich-Hurault . . . . .	900
14.2.5	Équations de la smectodynamique . . . . .	901
14.2.6	Ondes élastiques : premier et second sons . . . . .	905
14.2.7	Les écoulements de perméation . . . . .	908
14.2.8	Force sur une sphère en mouvement . . . . .	912
14.2.9	Fluage sous compression normale aux couches . . . . .	913
14.2.10	Les dislocations et la plasticité des smectiques . . . . .	916

14.2.11	Formation de « poireaux » et d'« oignons » sous cisaillement . . . . .	950
14.3	Canodynamique . . . . .	955
14.3.1	L'élasticité des phases colonnaires hexagonales . . . . .	956
14.3.2	Dislocations et parois . . . . .	958
14.3.3	Quatre instabilités des colonnes . . . . .	960
14.3.4	Rhéologie et fusion sous cisaillement . . . . .	968
<b>A</b>	<b>Théorème de « dérivation sous le signe somme »</b>	<b>973</b>
<b>B</b>	<b>Discontinuités tangentielles et ondes de choc (fluides parfaits)</b>	<b>975</b>
B.1	Conditions aux limites sur une surface de discontinuité . . . . .	975
B.1.1	Conservation de l'énergie . . . . .	976
B.1.2	Conservation de la masse . . . . .	976
B.1.3	Conservation de la quantité de mouvement . . . . .	976
B.2	Discontinuités tangentielles . . . . .	977
B.2.1	Définition . . . . .	977
B.2.2	Instabilité de Kelvin-Helmholtz (ou des discontinuités tangentielles) . . . . .	977
B.3	Ondes de choc . . . . .	978
B.3.1	Définition . . . . .	978
B.3.2	Adiabatique de choc . . . . .	979
B.3.3	Adiabatiques de choc dans un gaz parfait à chaleurs spécifiques constantes . . . . .	980
B.3.4	Ondes de choc en pratique . . . . .	983
<b>C</b>	<b>Équations de l'hydrodynamique pour un fluide incompressible</b>	<b>985</b>
C.1	Coordonnées cylindriques $(r, \theta, z)$ . . . . .	985
C.2	Coordonnées sphériques $(r, \theta, \varphi)$ . . . . .	986
<b>D</b>	<b>Équations de l'élasticité en coordonnées cylindriques et sphériques</b>	<b>989</b>
D.1	Coordonnées cylindriques $(r, \theta, z)$ . . . . .	989
D.2	Coordonnées sphériques $(r, \theta, \varphi)$ . . . . .	990
<b>E</b>	<b>Démonstration de la formule de Peach et Koehler</b>	<b>993</b>
<b>F</b>	<b>Rappel de cristallographie : indice de Miller</b>	<b>997</b>
F.1	Cristaux cubiques (c.c. et c.f.c.) . . . . .	997
F.2	Cristaux hexagonaux (h.c.) . . . . .	1000
F.3	Autres structures cristallines simples . . . . .	1002

<b>G Interaction entre une dislocation et un atome d'impureté</b>	<b>1003</b>
G.1 Effet de taille . . . . .	1003
G.2 Effet de module élastique . . . . .	1007
G.3 Comparaison entre les différents effets . . . . .	1008
<b>H Loi de Schmid et facteur de Taylor</b>	<b>1009</b>
H.1 Loi de Schmid . . . . .	1009
H.2 Facteur de Taylor . . . . .	1011
<b>I Modèle des haltères hookéens</b>	<b>1013</b>
<b>J Modèle de Giesekeus et modèle FENE</b>	<b>1017</b>
J.1 Le modèle de Giesekeus . . . . .	1017
J.2 Le modèle FENE . . . . .	1018
<b>K Démonstration de la loi d'Einstein</b>	<b>1021</b>
<b>L Les modèles fractionnaires de la viscoélasticité</b>	<b>1025</b>
L.1 Un nouvel élément fractionnaire : le « springpot » . . . . .	1026
L.2 L'exemple des gels . . . . .	1027
L.3 Les modèles fractionnaires de Maxwell et de Kelvin-Voigt . . . . .	1029
<b>M Dérivation simplifiée de l'énergie libre de Frank-Oseen</b>	<b>1033</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>1037</b>
<b>Notations</b>	<b>1098</b>
<b>Index</b>	<b>1109</b>