

# Table des matières

<b>Préface</b>	<b>iii</b>
<b>Avant-propos</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Introduction . . . . .	1
1.2 Les solides . . . . .	2
1.3 Les liquides . . . . .	6
1.4 Les suspensions . . . . .	11
1.4.1 Séparation de phases . . . . .	11
1.4.2 Impact de la présence de particules sur le comportement du mélange . . . . .	12
1.4.3 Effets additionnels . . . . .	13
1.5 Les colloïdes . . . . .	18
1.5.1 Interactions colloïdales . . . . .	18
1.5.2 Seuil de contrainte . . . . .	19
1.5.3 Thixotropie . . . . .	21
1.6 Les polymères . . . . .	24
1.6.1 Propriétés des chaînes de polymère . . . . .	24
1.6.2 Mise en solution . . . . .	25
1.6.3 Viscoélasticité . . . . .	26
1.6.4 Autres propriétés des polymères . . . . .	29
1.7 Les émulsions . . . . .	30
1.8 Les mousses . . . . .	33
1.9 Les granulaires . . . . .	34
1.10 Les matériaux « réels » . . . . .	37
<b>2 Matériaux simples</b>	<b>39</b>
2.1 Introduction . . . . .	39
2.2 Interactions entre composants élémentaires et états de la matière simple . . . . .	40
2.2.1 Composants élémentaires . . . . .	40
2.2.2 Agitation thermique . . . . .	41

2.2.3	Potentiel d'interaction . . . . .	42
2.2.4	Forces de van der Waals . . . . .	42
2.2.5	Liaisons chimiques . . . . .	43
2.2.6	Force de répulsion de Born . . . . .	44
2.2.7	Bilan des forces . . . . .	44
2.2.8	Lien hydrogène et forces hydrophobiques . . . . .	45
2.2.9	États de la matière simple . . . . .	46
2.3	L'état gazeux . . . . .	47
2.3.1	Distribution de vitesses . . . . .	47
2.3.2	Libre parcours moyen . . . . .	49
2.3.3	Entropie . . . . .	50
2.3.4	Loi d'état des gaz parfaits . . . . .	51
2.3.5	Théorie cinétique . . . . .	53
2.4	L'état liquide . . . . .	59
2.4.1	Transition de l'état gazeux vers l'état liquide . . . . .	59
2.4.2	Structure . . . . .	63
2.4.3	Déformation . . . . .	64
2.4.4	Écoulement . . . . .	65
2.4.5	Modélisation rhéophysique du comportement . . . . .	67
2.4.6	Tension interfaciale . . . . .	69
2.5	L'état solide . . . . .	70
2.5.1	Structures et interactions . . . . .	70
2.5.2	Microrhéologie dans le régime solide . . . . .	71
2.5.3	Élongation . . . . .	72
2.5.4	Comportement en cisaillement simple . . . . .	74
2.5.5	Compressibilité . . . . .	75
2.5.6	Résistance mécanique maximum . . . . .	76
2.5.7	Transition solide-liquide . . . . .	79
2.5.8	Transition solide-gaz . . . . .	79
2.6	L'état vitreux . . . . .	80
2.6.1	Les verres . . . . .	80
2.6.2	La transition vitreuse . . . . .	80
2.6.3	Comportement mécanique associé à la transition vitreuse . . . . .	82
2.6.4	Viscosité des verres . . . . .	83
<b>3</b>	<b>Suspensions</b> . . . . .	<b>85</b>
3.1	Introduction . . . . .	85
3.2	Préparation d'une suspension . . . . .	87
3.2.1	Point de vue géométrique . . . . .	87
3.2.2	Concentration volumique . . . . .	89
3.2.3	Mise en suspension : point de vue énergétique . . . . .	89
3.2.4	Comment disperser les particules? . . . . .	91
3.2.5	Combien de particules peut-on mettre en suspension? . . . . .	92
3.2.6	Résistance du liquide au déplacement d'une particule . . . . .	94

3.2.7	Stabilité . . . . .	97
3.3	Effet de la présence de particules sur le comportement du mélange . . . . .	100
3.4	Effet de la concentration . . . . .	102
3.4.1	Considérations générales . . . . .	102
3.4.2	Régimes de concentration . . . . .	104
3.4.3	Suspension diluée . . . . .	106
3.4.4	Suspension non diluée . . . . .	107
3.5	Effet de l'anisotropie des particules . . . . .	109
3.5.1	Des particules anisotropes idéales : les sphéroïdes . . . . .	110
3.5.2	Impact sur la viscosité de la présence de particules anisotropes (orientation uniforme et constante) . . . . .	110
3.5.3	Rotation des particules dans un fluide en cisaillement simple . . . . .	111
3.5.4	Effet de la concentration . . . . .	113
3.6	Effet de l'hétérogénéité de la concentration en particules . . . . .	115
3.7	Rhéoépaississement . . . . .	119
3.8	Suspensions dans un fluide à seuil . . . . .	121
3.8.1	Déplacement d'un objet à travers un fluide à seuil . . . . .	121
3.8.2	Stabilité . . . . .	123
3.8.3	Comportement . . . . .	124
<b>4</b>	<b>Polymères</b> . . . . .	<b>127</b>
4.1	Introduction . . . . .	127
4.2	Structure des polymères . . . . .	129
4.2.1	Longueur apparente d'une chaîne . . . . .	129
4.2.2	Distribution de longueur apparente des chaînes . . . . .	130
4.2.3	Rayon de giration . . . . .	132
4.2.4	Allongement d'une chaîne sous l'action d'une force . . . . .	132
4.2.5	Longueur de persistance . . . . .	134
4.3	Mise en solution d'un polymère . . . . .	137
4.3.1	Énergie libre configurationnelle . . . . .	138
4.3.2	Énergie libre associée aux interactions entre molécules . . . . .	139
4.3.3	Énergie libre totale et dimension de la chaîne . . . . .	140
4.4	Plusieurs chaînes en solution . . . . .	141
4.4.1	Régime dilué . . . . .	142
4.4.2	Régime semi-dilué . . . . .	143
4.4.3	Régime concentré . . . . .	144
4.4.4	Enchevêtrements . . . . .	145
4.5	Polymères réticulés et gels de polymères . . . . .	147
4.6	Comportement mécanique des polymères liquides . . . . .	150
4.6.1	Généralités . . . . .	150
4.6.2	Régime dilué . . . . .	153
4.6.3	Régime concentré . . . . .	156

4.6.4	Régime semi-dilué . . . . .	161
4.7	Impact de la température . . . . .	162
<b>5</b>	<b>Colloïdes</b> . . . . .	<b>165</b>
5.1	Introduction . . . . .	165
5.2	Mouvement brownien . . . . .	166
5.2.1	Principes de base . . . . .	166
5.2.2	Phénomène de diffusion . . . . .	170
5.2.3	Diffusion rotationnelle . . . . .	172
5.2.4	Pression osmotique . . . . .	172
5.2.5	Sédimentation et diffusion brownienne . . . . .	173
5.3	Forces de van der Waals . . . . .	175
5.4	Forces électrostatiques . . . . .	177
5.5	Effets de polymères adsorbés . . . . .	180
5.6	Interactions de déplétion . . . . .	183
5.7	Bilan des interactions . . . . .	185
5.8	Comportement des systèmes répulsifs . . . . .	188
5.8.1	Suspensions répulsives dures . . . . .	189
5.8.2	Suspensions répulsives molles . . . . .	193
5.9	Systèmes attractifs . . . . .	200
5.9.1	Structure . . . . .	200
5.9.2	Comportement des suspensions attractives . . . . .	203
5.10	Transition pâteux-hydrodynamique . . . . .	208
<b>6</b>	<b>Émulsions – mousses</b> . . . . .	<b>211</b>
6.1	Introduction . . . . .	211
6.2	Propriétés physiques à l'échelle des inclusions . . . . .	212
6.2.1	Énergie . . . . .	213
6.2.2	Différence de pression au passage d'une interface . . . . .	213
6.2.3	Déformation d'une inclusion fluide à vitesse nulle et volume constant . . . . .	214
6.2.4	Déplacement d'une inclusion dans un liquide au repos . . . . .	216
6.2.5	Sédimentation ou crémage . . . . .	217
6.3	Préparation . . . . .	217
6.3.1	Généralités . . . . .	217
6.3.2	Formation d'inclusions par déformation . . . . .	219
6.4	Stabilité . . . . .	222
6.4.1	Coalescence et stabilisation . . . . .	222
6.4.2	Mûrissement d'Ostwald . . . . .	227
6.5	Comportement mécanique . . . . .	229
6.5.1	Généralités . . . . .	229
6.5.2	Régimes de concentration . . . . .	231
6.5.3	Régime dilué . . . . .	233
6.5.4	Régime semi-dilué . . . . .	235
6.5.5	Régime concentré . . . . .	236

<b>7</b>	<b>Matériaux granulaires</b>	<b>243</b>
7.1	Introduction . . . . .	243
7.2	Principaux types d'interactions directes . . . . .	245
7.2.1	Contact « lubrifié » . . . . .	245
7.2.2	Contact « frictionnel » . . . . .	247
7.2.3	Collision . . . . .	248
7.3	Le rôle de la configuration . . . . .	250
7.3.1	Principe général . . . . .	250
7.3.2	Dilatance . . . . .	251
7.3.3	Tassement . . . . .	252
7.3.4	État du système . . . . .	253
7.4	Régimes de comportement . . . . .	253
7.5	Régime frictionnel . . . . .	255
7.5.1	Cisaillement simple . . . . .	255
7.5.2	Loi de comportement . . . . .	257
7.5.3	Applications à des écoulements quasi-statiques . . . . .	261
7.6	Régime collisionnel . . . . .	264
7.7	Régimes intermédiaires . . . . .	267
7.7.1	Transition du régime frictionnel au régime collisionnel . . . . .	267
7.7.2	Transition du régime frictionnel au régime lubrifié . . . . .	267
<b>8</b>	<b>Rhéométrie</b>	<b>273</b>
8.1	Introduction . . . . .	273
8.2	Géométries de base . . . . .	274
8.2.1	Disques parallèles . . . . .	274
8.2.2	Cône-plan . . . . .	276
8.2.3	Cylindres coaxiaux . . . . .	277
8.2.4	Écoulement en conduite . . . . .	279
8.3	Phénomènes perturbateurs des mesures . . . . .	281
8.3.1	Perturbations du volume de l'échantillon . . . . .	281
8.3.2	Glissement aux parois . . . . .	282
8.3.3	Migration . . . . .	286
8.3.4	Bandes de cisaillement . . . . .	286
8.3.5	Instabilité associée à une courbe d'écoulement décroissante . . . . .	288
8.3.6	Autres phénomènes perturbateurs . . . . .	289
8.4	Procédures expérimentales . . . . .	290
8.4.1	Choix de la géométrie . . . . .	291
8.4.2	Préparation du matériau . . . . .	291
8.4.3	Courbe d'écoulement . . . . .	292
8.4.4	Seuil d'écoulement . . . . .	294
8.5	Techniques de mesure pratiques . . . . .	295
8.5.1	Écrasement . . . . .	296
8.5.2	Plan incliné . . . . .	298

<b>Annexe A : Mécanique des fluides : principes de base et origines physiques</b>	<b>301</b>
A.1 Introduction . . . . .	301
A.2 Les variables de l'écoulement . . . . .	302
A.3 Continuité du milieu . . . . .	303
A.4 Les forces en jeu . . . . .	305
A.5 Conservation de la masse . . . . .	311
A.6 Conservation de la quantité de mouvement . . . . .	311
A.7 Les fluctuations temporelles . . . . .	313
A.8 La turbulence . . . . .	314
A.9 Résolution d'un problème d'écoulement . . . . .	315
A.10 Lois de comportement . . . . .	316
A.10.1 Généralités . . . . .	316
A.10.2 Le tenseur des taux de déformation . . . . .	317
A.10.3 Forme simplifiée de la loi de comportement . . . . .	318
A.10.4 Cisaillement simple . . . . .	319
A.10.5 Élongation . . . . .	320
A.10.6 Dissipations d'énergie . . . . .	321
A.10.7 Principaux types de comportement . . . . .	321
<b>Annexe B : Éléments de thermodynamique</b>	<b>323</b>
B.1 Premier principe . . . . .	323
B.2 Entropie . . . . .	325
B.3 Second principe . . . . .	325
B.4 Énergie libre . . . . .	326
B.5 Distribution d'énergie . . . . .	326
<b>Liste des symboles</b>	<b>329</b>
<b>Index</b>	<b>333</b>