

SCIENCES SUP



*Cours et exercices d'application*

**L3 • Master • Écoles d'ingénieurs**

# **MATÉRIAUX**

## **2. Microstructures, mise en œuvre et conception**

3<sup>e</sup> édition  
entièrement refondue



**Michael F. Ashby  
David R. H. Jones**

**DUNOD**

# Table des matières

AVANT-PROPOS	XI
AVANT-PROPOS DES TRADUCTEURS	XV
<b>PARTIE A • MÉTAUX</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE 1 • MÉTAUX</b>	<b>2</b>
1.1 Introduction	2
1.2 Les métaux pour une maquette de tracteur à vapeur	2
1.3 Métaux pour les boîtes de boisson	8
1.4 Métaux pour les prothèses de hanches	10
1.5 Données pour les métaux	11
<b>CHAPITRE 2 • LA STRUCTURE DES MÉTAUX</b>	<b>15</b>
2.1 Introduction	15
2.2 Structures cristallines et structures amorphes	16
2.3 Structure des solutions et des composés	18
2.4 Phases	19
2.5 Joints de grains et joints de phases	20
2.6 Forme des grains et des phases	22
2.7 Résumé : constitution et structure	24
<b>CHAPITRE 3 • CONSTITUTION D'ÉQUILIBRE ET DIAGRAMMES DE PHASES</b>	<b>27</b>
3.1 Introduction	27
3.2 Définitions	28

3.3	Le diagramme de phases plomb-étain	29
3.4	Constitutions non complètement définies	33
3.5	Autres diagrammes de phases	34
<b>CHAPITRE 4 • ÉTUDE DE CAS DE DIAGRAMMES DE PHASES</b>		<b>37</b>
4.1	Introduction	37
4.2	Le choix des alliages de brasure tendre	37
4.3	Silicium pur pour circuits intégrés	41
4.4	Fabrication de la glace sans bulles	46
<b>CHAPITRE 5 • FORCE MOTRICE POUR LES CHANGEMENTS STRUCTURAUX</b>		<b>50</b>
5.1	Introduction	50
5.2	Forces motrices	51
5.3	Réversibilité	54
5.4	Stabilité, instabilité, métastabilité	55
5.5	Force motrice pour la solidification	56
5.6	Changements de phase à l'état solide	58
5.7	Coalescence de précipités	59
5.8	Croissance de grains	60
5.9	Recristallisation	60
5.10	Ordres de grandeur des forces motrices	61
<b>CHAPITRE 6 • CINÉTIQUE DES CHANGEMENTS STRUCTURAUX</b>		<b>63</b>
<b>I : TRANSFORMATIONS DIFFUSIVES</b>		<b>63</b>
6.1	Introduction	63
6.2	Solidification	64
6.3	Effets de flux de chaleur	69
6.4	Changements de phases à l'état solide	70
6.5	Cinétiques contrôlées par la diffusion	70
6.6	Forme des grains et des phases	72
<b>CHAPITRE 7 • CINÉTIQUES DES CHANGEMENTS STRUCTURAUX</b>		<b>75</b>
<b>II : GERMINATION</b>		<b>75</b>
7.1	Introduction	75
7.2	Germination dans les liquides	75
7.3	Germination hétérogène	78
7.4	Germination dans les solides	81

7.5	Résumé	82
7.6	Post-scriptum	82
<b>CHAPITRE 8 • CINÉTIQUE DES CHANGEMENTS STRUCTURAUX</b>		
<b>III : TRANSFORMATIONS DISPLACIVES</b>		
8.1	Introduction	85
8.2	La transformation diffusive C.F.C. → C.C. du fer pur	86
8.3	Le diagramme temps-température-transformation (TTT)	90
8.4	La transformation displacive C.F.C. → C.C.	90
8.5	Détail de la formation de la martensite	93
8.6	Transformation martensitique dans les aciers	95
8.7	Les diverses martensites	96
<b>CHAPITRE 9 • ÉTUDE DE CAS : TRANSFORMATIONS DE PHASES</b>		
9.1	Introduction	99
9.2	La pluie artificielle	99
9.3	Coulées à grain fin	102
9.4	Monocristaux pour semi-conducteurs	105
9.5	Métaux amorphes	108
<b>CHAPITRE 10 • ALLIAGES LÉGERS</b>		
10.1	Introduction	111
10.2	Durcissement de solution solide	113
10.3	Durcissement de précipitation (durcissement structural)	115
10.4	Durcissement d'écroutissage	122
10.5	Stabilité thermique	123
<b>CHAPITRE 11 • ACIERS I : ACIERS AU CARBONE</b>		
11.1	Introduction	125
11.2	Microstructures produites par refroidissement lent (normalisation)	126
11.3	Propriétés mécaniques des aciers normalisés	130
11.4	Aciers trempés et revenus	131
11.5	Fontes	133
11.6	Remarques sur le diagramme TTT	135
<b>CHAPITRE 12 • ACIERS II : ACIERS ALLIÉS</b>		
12.1	Introduction	138

12.2	Trempeabilité	138
12.3	Durcissement de solution solide	141
12.4	Durcissement de précipitation	142
12.5	Résistance à la corrosion	143
12.6	Aciers inoxydables	143
<b>CHAPITRE 13 • ÉTUDES DE CAS : LES ACIERS</b>		<b>147</b>
13.1	Travail de détective métallurgiste après l'explosion d'une chaudière	147
13.2	Comment souder des aciers en toute sécurité	151
13.3	Le cas du marteau cassé	153
<b>CHAPITRE 14 • PRODUCTION, MISE EN FORME ET ASSEMBLAGE DES MÉTAUX</b>		<b>158</b>
14.1	Introduction	158
14.2	Moulage	159
14.3	Procédés de corroyage	163
14.4	Restauration et recristallisation	168
14.5	Usinage	170
14.6	Assemblage	171
14.7	Les traitements de surfaces	172
14.8	Mise en forme et économies d'énergie	173
<b>PARTIE B • CÉRAMIQUES ET VERRES</b>		<b>177</b>
<b>CHAPITRE 15 • CÉRAMIQUES ET VERRES</b>		<b>178</b>
15.1	Introduction	178
15.2	Les céramiques et verres typiques	180
15.3	Données concernant les céramiques	183
<b>CHAPITRE 16 • STRUCTURE DES CÉRAMIQUES</b>		<b>186</b>
16.1	Introduction	186
16.2	Céramiques ioniques et céramiques covalentes	186
16.3	Les céramiques ioniques simples	187
16.4	Les céramiques covalentes simples	189
16.5	La silice et les silicates	190
16.6	Les verres de silice	192
16.7	Les alliages de céramiques	193

16.8	La microstructure des céramiques	194
16.9	Les céramiques vitrifiées, ou terres cuites	195
16.10	Pierres et roches	196
16.11	Les composites à base de céramiques	196
<b>CHAPITRE 17 • LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES CÉRAMIQUES</b>		<b>197</b>
17.1	Introduction	197
17.2	Les modules d'élasticité	197
17.3	Résistance mécanique, dureté et résistance du réseau cristallin	198
17.4	Résistance à la rupture des céramiques	201
17.5	Résistance aux chocs thermiques	203
17.6	Fluage des céramiques	204
<b>CHAPITRE 18 • LA STATISTIQUE DE LA RUPTURE FRAGILE THÉORIE ET ÉTUDE DE CAS</b>		<b>207</b>
18.1	Introduction	207
18.2	Statistique de la résistance mécanique et distribution de Weibull	208
18.3	Variation au cours du temps de la résistance mécanique des céramiques	212
18.4	Étude de cas : conception d'un hublot d'installation sous pression	214
<b>CHAPITRE 19 • PRODUCTION, MISE EN FORME ET ASSEMBLAGE DES CÉRAMIQUES</b>		<b>219</b>
19.1	Introduction	219
19.2	Production des céramiques techniques	220
19.3	Mise en forme des céramiques techniques	220
19.4	Production et mise en forme du verre	225
19.5	Production et mise en forme des terres cuites	228
19.6	Amélioration des performances des céramiques	229
19.7	Assemblage des céramiques	232
<b>CHAPITRE 20 • UN CAS PARTICULIERS : LES CIMENTS ET LES BÉTONS</b>		<b>235</b>
20.1	Introduction	235
20.2	La chimie des ciments	235
20.3	Structure du ciment Portland	238
20.4	Le béton	240
20.5	Résistance mécanique des ciments et bétons	241
20.6	Les ciments à haute résistance	244

<b>PARTIE C • POLYMÈRES ET COMPOSITES</b>		
<b>CHAPITRE 21 • LES POLYMÈRES</b>		247
21.1 Introduction		248
21.2 Les polymères-types		250
21.3 Données sur les propriétés des polymères		253
<b>CHAPITRE 22 • LA STRUCTURE DES POLYMÈRES</b>		258
22.1 Introduction		258
22.2 La longueur moléculaire et le degré de polymérisation		259
22.3 L'architecture moléculaire		260
22.4 L'arrangement des macromolécules et la transition vitreuse		263
<b>CHAPITRE 23 • LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES POLYMÈRES</b>		270
23.1 Introduction		270
23.2 La rigidité		271
23.3 La résistance à la déformation : l'étirage à froid et les craquelures		280
<b>CHAPITRE 24 • PRODUCTION, MISE EN FORME ET ASSEMBLAGE DES POLYMÈRES</b>		288
24.1 Introduction		288
24.2 La synthèse des polymères		289
24.3 Les alliages de polymères		290
24.4 La mise en forme des polymères		292
24.5 L'assemblage des polymères		296
<b>CHAPITRE 25 • LES COMPOSITES : FIBREUX, PARTICULAIRES OU EXPANSÉS</b>		298
25.1 Introduction		298
25.2 Les composites fibreux		299
25.3 Les composites particulaires		308
25.4 Les solides cellulaires, ou mousses		309
25.5 Des matériaux aux propriétés « à la carte »		313
<b>CHAPITRE 26 • UN CAS PARTICULIER : LE BOIS</b>		316
26.1 Introduction		316
26.2 La structure du bois		317
26.3 Les propriétés mécaniques du bois		320
26.4 Résumé : le bois comparé aux autres matériaux		325

<b>PARTIE D • LA CONCEPTION AU MOYEN DE MÉTAUX, DE CÉRAMIQUES, DE POLYMÈRES ET DE COMPOSITES</b>	<b>329</b>
<b>CHAPITRE 27 • LES MATÉRIAUX DANS LA CONCEPTION DE STRUCTURES</b>	<b>330</b>
27.1 Introduction	330
27.2 La méthodologie de la conception	333
<b>CHAPITRE 28 • ÉTUDES DE CAS EN CONCEPTION</b>	<b>338</b>
28.1 Conception au moyen de métaux	338
28.2 Conception à base de céramiques : les forces exercées par la glace sur une plate-forme en mer	346
28.3 Conception à base de polymères : une roue en matière plastique	351
28.4 Conception à base de composites : des matériaux pour la table d'un violon	356
<b>CHAPITRE 29 • ACCIDENTS TECHNIQUES ET CATASTROPHES INDUSTRIELLES : LA SANCTION ULTIME DES ERREURS DE CONCEPTION</b>	<b>364</b>
29.1 Introduction	364
29.2 Étude de cas n° 1 – La catastrophe du pont ferroviaire sur la Tay – 28 décembre 1879	366
29.3 Étude de cas n° 2 – Les accidents des Comet – 10 janvier et 8 avril 1954	374
29.4 Étude de cas n° 3 – La catastrophe ferroviaire d'Eschede – 5 juin 1998	380
29.5 Étude de cas n° 4 – Un accident mortel de saut à l'élastique	385
<b>ANNEXE 1 • APPRENEZ VOUS-MÊME LES DIAGRAMMES DE PHASES</b>	<b>391</b>
Partie 1 : constituants, phases et structures	392
Partie 2 : les systèmes à un et deux constituants	401
Partie 3 : eutectiques, eutectoides et péritectiques	415
Partie 4 : problèmes d'application	431
<b>ANNEXE 2 • SYMBOLES ET FORMULES</b>	<b>438</b>
<b>ANNEXE 3 • CONSTANTES PHYSIQUES – CONVERSIONS D'UNITÉS</b>	<b>444</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>447</b>
<b>INDEX ET LEXIQUE FRANÇAIS - ANGLAIS</b>	<b>449</b>
<b>INDEX ET LEXIQUE ANGLAIS - FRANÇAIS</b>	<b>457</b>