

Avant-propos de la troisième édition	XV
Avant-propos de la première édition	XIX

Chapitre 1 Méthodes de caractérisation des matériaux

1.1 Contraintes et déformations	1
1.1.1 Traction simple	2
1.1.2 Torsion simple	4
1.1.3 Cas général : corps soumis à un ensemble de forces	6
1.2 Caractérisation des propriétés mécaniques	8
1.2.1 Essai de traction	9
1.2.2 Essai de compression	17
1.2.3 Essai de flexion	19
1.2.4 Essais de dureté	20
1.2.5 Autres essais	22
1.3 Caractérisation de la microstructure	22
1.3.1 Microscope optique	24
1.3.2 Microscope électronique à transmission	25
1.3.3 Microscope électronique à balayage	26

Chapitre 2 Cohésion et rigidité des matériaux

2.1 Rigidité des matériaux	31
2.2 Modèle des ressorts	33
2.2.1 Description du modèle et loi de Hooke	33
2.2.2 Énergie élastique emmagasinée	35
2.2.3 Contraction latérale en traction et coefficient de Poisson	36
2.2.4 Résistance théorique à la traction	37
2.3 Modèle électrostatique	40
2.3.1 Description du modèle	40
2.3.2 Loi de Hooke et module d'Young	42
2.3.3 Résistance théorique à la traction	46
2.3.4 Dilatation thermique selon le modèle électrostatique	47
2.4 Types de liaisons	49
2.4.1 Liaison covalente	49
2.4.2 Liaison ionique	52
2.4.3 Liaison métallique	54
2.4.4 Liaisons mixtes	55
2.4.5 Liaisons de faible intensité	57
2.4.6 Propriétés des matériaux et types de liaisons	60

Chapitre 3 Architecture atomique

3.1	Ensembles d'atomes : du désordre à l'ordre	65
3.1.1	Désordre complet : les gaz	65
3.1.2	Ordre parfait : les solides cristallins	66
3.1.3	Liquides et solides amorphes	69
3.2	Notions de cristallographie	73
3.2.1	Systèmes et réseaux cristallins	73
3.2.2	Repérage des directions et des plans	75
3.2.2.1	Indices des directions	75
3.2.2.2	Indices de Miller des plans	76
3.2.2.3	Cas des structures hexagonales	77
3.2.3	Densité des nœuds et nœuds en propre	78
3.2.4	Arrangement des atomes dans un réseau cristallin	80
3.2.5	Sites dans les réseaux cristallins	81
3.3	Structure des solides cristallins	83
3.3.1	Structures des solides à liaison métallique	83
3.3.2	Structures des solides à liaison covalente	86
3.3.3	Structures des solides à liaison ionique	89
3.3.4	Structures des polymères	92
3.4	Défauts dans les cristaux	94
3.4.1	Défauts sans dimension	94
3.4.2	Défauts à une dimension	98
3.4.3	Défauts à deux dimensions	102
3.4.4	Défauts à trois dimensions	105

Chapitre 4 Matériaux sous contrainte

4.1	Résistance des matériaux fragiles à la traction	107
4.1.1	Résistance théorique et résistance réelle	107
4.1.2	Zones de concentration de contrainte	110
4.2	Limite d'élasticité des matériaux ductiles	115
4.2.1	Glissement cristallographique	115
4.2.2	Cission critique théorique de glissement	119
4.2.3	Dislocations et limite d'élasticité	124
4.2.4	Force s'exerçant sur une dislocation	127
4.2.5	Multiplication des dislocations	130
4.2.6	Consolidation	132
4.2.7	Cristallinité et ductilité	134
4.2.8	Intérêt de la ductilité	138
4.3	Ténacité	142
4.3.1	Définition	142
4.3.2	Ténacité des matériaux fragiles	144
4.3.3	Amélioration de la ténacité des matériaux fragiles	150
4.3.3.1	Obtention de contraintes de compression	150

4.3.3.2 Mise à profit de la triaxialité des contraintes en tête de fissure 151

4.3.4 Ténacité des matériaux ductiles 154

4.3.5 Évaluation de la ténacité 158

4.4 Introduction à la mécanique de la rupture 161

4.4.1 Modes d'ouverture d'une fissure 162

4.4.2 Champs de contraintes en tête d'une fissure 162

4.4.3 Critère de rupture d'un corps fissuré 164

4.4.4 État de contraintes planes et état de déformations planes 166

4.4.5 Détermination expérimentale du facteur critique d'intensité de contrainte 168

Chapitre 5 Mélanges et leur comportement

5.1 Introduction 171

5.1.1 Définitions 171

5.1.2 Règle des phases 172

5.2 Diagrammes d'équilibre binaires 172

5.2.1 Miscibilité totale à l'état solide 173

5.2.2 Solidification à l'équilibre d'une solution à miscibilité totale 174

5.2.3 Proportion des phases en présence 175

5.2.4 Règles de miscibilité 177

5.2.5 Miscibilité partielle à l'état solide 177

5.2.5.1 Transformation eutectique 178

5.2.5.2 Microstructures des mélanges eutectiques 183

5.2.5.3 Transformation péritectique 184

5.2.6 Phases intermédiaires 186

5.2.7 Considérations générales sur les diagrammes d'équilibre binaires 188

5.2.8 Transformations à l'état solide 189

5.2.8.1 Précipitation d'une seconde phase 189

5.2.8.2 Diagramme d'équilibre fer-carbone 190

5.2.9 Diagrammes d'équilibre ternaires 193

5.3 Transfert et mouvements d'atomes 197

5.3.1 Mécanismes de diffusion 198

5.3.1.1 Solutions solides de substitution 199

5.3.1.2 Solutions solides d'insertion 200

5.3.2 Lois de la diffusion 200

5.3.3 Applications de la diffusion 206

5.4 Phénomènes liés à la solidification 208

5.4.1 Solidification d'un métal pur 208

5.4.1.1 Équilibre liquide-solide 208

5.4.1.2 Germination et croissance 209

5.4.2 Solidification des alliages 215

5.4.3 Structures de solidification 218

5.4.3.1 Croissance dendritique 219

5.4.3.2 Structure générale d'une pièce solidifiée 219

5.4.3.3	Ségrégation	221
5.4.4	Formation de secondes phases à l'état solide	224

Chapitre 6 Modifications des propriétés mécaniques

6.1	Métaux et alliages	227
6.1.1	Durcissement par écrouissage	229
6.1.2	Durcissement par affinement de la taille des grains	232
6.1.3	Durcissement par solution solide	234
6.1.4	Durcissement structural	236
6.1.5	Système fer-carbone (aciers)	246
6.1.5.1	Diagramme d'équilibre fer-carbone	247
6.1.5.2	Transformation eutectoïde	249
6.1.5.3	Courbes de transformation	250
6.1.5.4	Transformation martensitique	252
6.1.5.5	Revenu de la martensite	255
6.1.6	Recuits : restauration des propriétés	256
6.1.6.1	Force motrice de la restauration	257
6.1.6.2	Processus de restauration	258
6.2	Polymères	262
6.2.1	Cristallinité	264
6.2.2	Ramification	266
6.2.3	Réticulation	266
6.2.4	Copolymérisation et mélanges	267
6.2.5	Utilisation d'additifs	268

Chapitre 7 Propriétés mécaniques

7.1	Introduction	271
7.2	Viscoélasticité et viscoplasticité	273
7.2.1	Viscoélasticité	273
7.2.2	Viscoplasticité	276
7.3	Fluage	277
7.3.1	Influences de la contrainte et de la température	277
7.3.2	Fluage des métaux	278
7.3.3	Fluage des polymères	283
7.3.4	Fluage des céramiques	284
7.4	Transition ductile-fragile	285
7.4.1	Influence de la température sur la ductilité	286
7.4.2	Autres facteurs qui influencent la transition ductile-fragile	287
7.4.3	Détermination de la transition ductile-fragile	290
7.5	Fatigue	295
7.5.1	Définition	295
7.5.2	Courbe d'endurance	299
7.5.3	Mécanismes de fatigue	301

7.5.4	Vitesse de fissuration	305
7.5.5	Facteurs qui influencent le comportement en fatigue	307
7.6	Résistance aux chocs thermiques	316
7.6.1	Contraintes thermiques	316
7.6.2	Choc thermique	317

Chapitre 8 Dégradation des matériaux

8.1	Corrosion des métaux en milieu aqueux	323
8.1.1	Réactions électrochimiques	324
8.1.2	Potentiels d'équilibre	327
8.1.3	Cinétique de la corrosion	332
8.1.3.1	Polarisation d'activation	334
8.1.3.2	Polarisation de diffusion	335
8.1.4	Passivation	336
8.1.4.1	Description du phénomène	336
8.1.4.2	Nature de la couche passive	336
8.1.4.3	Corrosion des alliages passivables	337
8.2	Modes de corrosion	339
8.2.1	Corrosion galvanique	339
8.2.2	Facteurs métallurgiques et facteurs de mise en œuvre	344
8.2.2.1	Métaux purs et alliages monophasés	345
8.2.2.2	Alliages polyphasés	345
8.2.2.3	Ségrégation	348
8.2.2.4	Effet de l'écroutissage et des contraintes	349
8.2.3	Effets du milieu de corrosion	349
8.2.3.1	Corrosion par les eaux	356
8.2.3.2	Corrosion atmosphérique	357
8.2.3.3	Corrosion par les sols	358
8.2.4	Conditions d'utilisation	359
8.2.4.1	Fatigue-corrosion	359
8.2.4.2	Corrosion par frottement	360
8.2.4.3	Gradient de température	361
8.2.4.4	Courants vagabonds	361
8.3	Lutte contre la corrosion	361
8.3.1	Protection électrochimique	362
8.3.1.1	Protection cathodique	362
8.3.1.2	Protection anodique	364
8.3.2	Protection par revêtements et traitements des surfaces	366
8.3.2.1	Revêtements non métalliques	366
8.3.2.2	Revêtements métalliques	366
8.3.2.3	Traitements des surfaces par voie chimique	368
8.3.3	Action sur le milieu de corrosion	368
8.3.3.1	Diminution du pouvoir oxydant de l'électrolyte	368

	8.3.3.2	Addition d'inhibiteurs	368
	8.3.3.3	Addition de passivateurs	370
	8.3.4	Choix des matériaux	370
	8.3.5	Conception et tracé des assemblages	370
8.4		Corrosion sèche (oxydation)	374
	8.4.1	Aspects thermodynamiques de l'oxydation	374
	8.4.2	Processus de formation de la couche d'oxyde	376
	8.4.3	Cinétique de l'oxydation	378
	8.4.4	Protection contre la corrosion sèche	381
	8.4.4.1	Alliages réfractaires	381
	8.4.4.2	Revêtements protecteurs	382
8.5		Dégradation des matières plastiques	383
	8.5.1	Viellissement physique	383
	8.5.1.1	Migration des plastifiants	383
	8.5.1.2	Action des solvants	383
	8.5.1.3	Fissuration sous contrainte en milieu tensioactif	386
	8.5.2	Viellissement et dégradation chimiques	387
	8.5.2.1	Oxydation	387
	8.5.2.2	Photodégradation	387
	8.5.2.3	Dégradation thermique	388
8.6		Dégradation des céramiques	388
	8.6.1	Dégradation du béton	389
	8.6.1.1	Dégradation du béton sous l'action des sulfates	389
	8.6.1.2	Corrosion de l'acier d'armature	389
	8.6.1.3	Dégradation climatique	390
	8.6.2	Dégradation climatique du calcaire	390

Chapitre 9 Propriétés physiques

9.1		Propriétés thermiques	393
	9.1.1	Capacité thermique	393
	9.1.2	Conductibilité thermique	397
9.2		Propriétés électriques	402
	9.2.1	Rappels concernant la théorie des bandes	402
	9.2.2	Conductibilité et résistivité électriques	407
	9.2.3	Conducteurs électriques	410
	9.2.3.1	Influence de la température	411
	9.2.3.2	Influence de la composition du matériau	412
	9.2.4	Supraconductivité	418
	9.2.5	Isolants électriques (diélectriques)	422
	9.2.6	Ferroélectricité et piézoélectricité	429
	9.2.7	Semi-conducteurs	434
	9.2.7.1	Semi-conducteurs intrinsèques	434
	9.2.7.2	Semi-conducteurs extrinsèques	438

9.2.7.3	Utilisation des semi-conducteurs	443
9.3	Propriétés magnétiques	446
9.3.1	Diamagnétisme	448
9.3.2	Paramagnétisme	448
9.3.3	Ferromagnétisme	449
9.3.3.1	Domaines magnétiques	451
9.3.3.2	Courbe de magnétisation et boucle d'hystérésis	451
9.3.3.3	Influence de la microstructure du matériau	454
9.3.3.4	Influence de la température	457
9.3.4	Antiferromagnétisme	457
9.3.5	Ferrimagnétisme	458
9.3.6	Applications du magnétisme	460
Chapitre 10 Alliages à base de fer		
10.1	Introduction	465
10.1.1	Nuances d'aciers	465
10.1.2	Désignation des aciers	466
10.2	Aciers d'usage général	467
10.2.1	Composition et propriétés	467
10.2.2	Aciers à propriétés améliorées	469
10.2.2.1	Aciers microalliés	469
10.2.2.2	Aciers <i>dual-phase</i>	470
10.2.2.3	Aciers à résistance améliorée à la corrosion	471
10.2.3	Produits sidérurgiques	472
10.2.3.1	Produits longs	472
10.2.3.2	Produits plats	472
10.3	Traitements thermiques des aciers	473
10.3.1	Recuits	473
10.3.1.1	Recuit de normalisation	473
10.3.1.2	Recuit complet	473
10.3.1.3	Recuit de coalescence	473
10.3.1.4	Recuit de recristallisation	474
10.3.1.5	Recuit de détente	474
10.3.2	Traitements thermiques dans la masse	474
10.3.2.1	Austénitisation	474
10.3.2.2	Trempe	475
10.3.2.3	Revenu	479
10.3.3	Traitements de surface	479
10.3.3.1	Trempe superficielles	480
10.3.3.2	Traitements thermochimiques	481
10.4	Aciers de traitements thermiques	483
10.4.1	Insuffisances des aciers au carbone	484
10.4.1.1	Résistance mécanique à l'état normalisé et à l'état recuit	484

10.4.1.2	Trempabilité	484
10.4.1.3	Tenue à chaud	486
10.4.1.4	Résistance à l'usure	486
10.4.1.5	Résistance à la corrosion	486
10.4.2	Action générale des éléments d'addition	486
10.4.3	Action spécifique des éléments d'addition	487
10.4.3.1	Éléments gammagènes	487
10.4.3.2	Éléments alphagènes	488
10.5	Aciers à outils	490
10.5.1	Caractéristiques d'utilisation	492
10.5.2	Éléments d'addition	492
10.5.3	Traitements thermiques	493
10.6	Aciers inoxydables	494
10.6.1	Constitution des aciers inoxydables	494
10.6.2	Aciers inoxydables martensitiques	498
10.6.3	Aciers inoxydables ferritiques	498
10.6.4	Aciers inoxydables austénitiques	501
10.6.5	Aciers inoxydables austénoferritiques	502
10.6.6	Aciers inoxydables à durcissement par précipitation	502
10.7	Fontes	503
10.7.1	Fontes blanches	504
10.7.2	Fontes grises	505
10.7.3	Fontes malléables	507
10.7.4	Fontes à graphite sphéroïdal (fontes GS)	508

Chapitre 11 Métaux et alliages non ferreux

11.1	Aluminium et alliages d'aluminium	511
11.1.1	Principales caractéristiques de l'aluminium	511
11.1.2	Alliages corroyés	513
11.1.2.1	Alliages sans durcissement structural	514
11.1.2.2	Alliages à durcissement structural	518
11.1.3	Alliages de fonderie	520
11.2	Cuivre et alliages de cuivre	523
11.2.1	Cuivres industriels	525
11.2.1.1	Cuivre électrolytique	525
11.2.1.2	Cuivre libre d'oxygène	527
11.2.1.3	Cuivre désoxydé	527
11.2.2	Alliages Cu-Zn (les laitons)	527
11.2.3	Alliages Cu-Sn (les bronzes)	530
11.2.4	Alliages Cu-Al (les cupro-aluminiums)	532
11.2.5	Alliages Cu-Ni et Cu-Zn-Ni (les cupronickels et les maillechorts)	533
11.3	Magnésium et alliages de magnésium	534
11.4	Zinc et alliages de zinc	535

11.5	Titane et alliages de titane	537
11.5.1	Titane non allié	539
11.5.2	Alliages de titane	539
11.5.2.1	Alliages alpha	539
11.5.2.2	Alliages alpha-bêta	540
11.5.2.3	Alliages bêta	541
11.6	Alliages réfractaires	543
11.6.1	Alliages réfractaires à base de fer et de nickel	545
11.6.2	Superalliages à base de nickel	545
11.6.3	Superalliages à base de cobalt	546

Chapitre 12 Matières plastiques

12.1	Composition chimique	549
12.1.1	Unités fondamentales ou monomères	549
12.1.2	Polymérisation par addition	552
12.1.3	Polymérisation par condensation (polycondensation)	554
12.1.4	Degré de polymérisation	557
12.1.5	Types de matières plastiques	558
12.1.5.1	Matières thermoplastiques	558
12.1.5.2	Matières thermodurcissables	559
12.1.5.3	Élastomères	559
12.2	Architecture atomique des polymères	559
12.2.1	Polymères linéaires amorphes	560
12.2.2	Polymères ramifiés	567
12.2.3	Polymères réticulés	567
12.2.4	Cristallisation des polymères	571
12.2.5	Adjuvants et renforts	578
12.2.5.1	Adjuvants	578
12.2.5.2	Renforts	579
12.3	Propriétés physiques des polymères	580
12.3.1	Masse volumique	581
12.3.2	Propriétés thermiques	582
12.3.3	Propriétés électriques	583
12.3.4	Propriétés optiques	584
12.4	Propriétés mécaniques des polymères	585

Chapitre 13 Céramiques

13.1	Propriétés générales des céramiques	595
13.1.1	Liaisons	595
13.1.2	Structure cristalline	597
13.1.3	Microstructure et propriétés	600
13.2	Céramiques traditionnelles	602
13.3	Céramiques techniques	603

13.3.1	Abrasifs et outils de coupe	603
13.3.2	Construction mécanique	605
13.3.3	Électrotechnique et électronique	608
13.3.3.1	Céramiques pour isolateurs	609
13.3.3.2	Céramiques ferroélectriques	610
13.3.3.3	Céramiques ferrimagnétiques	611
13.4	Céramiques réfractaires et isolantes thermiques	612
13.4.1	Propriétés générales des réfractaires	612
13.4.2	Types de réfractaires	614
13.4.2.1	Réfractaires acides	614
13.4.2.2	Réfractaires basiques	615
13.4.2.3	Réfractaires à base de graphite	615
13.4.3	Matériaux isolants thermiques	615
13.5	Verres	616
13.5.1	Formateurs et modificateurs de réseau	620
13.5.2	Propriétés générales des verres	621
13.5.2.1	Propriétés optiques	621
13.5.2.2	Propriétés thermiques	622
13.5.2.3	Propriétés mécaniques	622
13.5.3	Vitrocéramiques	623
13.6	Graphites et dérivés	624
13.6.1	Graphites traditionnels	625
13.6.2	Matériaux carbonés	625
13.7	Ciments et bétons	627
13.7.1	Ciments	628
13.7.2	Adjuvants	630
13.7.2.1	Accélérateurs de durcissement	630
13.7.2.2	Retardateurs de prise	630
13.7.2.3	Réducteurs d'eau (plastifiants)	630
13.7.2.4	Entraîneurs d'air	631
13.7.2	Bétons	631

Chapitre 14 Matériaux composites

14.1	Comportement mécanique des matériaux composites	634
14.1.1	Fibres continues unidirectionnelles	636
14.1.2	Fibres courtes alignées	641
14.1.3	Influence de l'orientation des fibres sur le comportement mécanique	647
14.1.4	Fibres orientées aléatoirement	651
14.2	Fibres de renfort	652
14.2.1	Fibres de verre	652
14.2.2	Fibres de polymères	654
14.2.3	Fibres de carbone	655
14.2.4	Renforts minéraux	656

14.2.5	Fibres métalliques et fibres céramiques	657
14.3	Matrices	659
14.3.1	Matrices organiques	659
14.3.2	Matrices carbonées	660
14.3.3	Matrices métalliques	662
14.3.4	Matrices céramiques	666
14.3.5	Ciment, béton et plâtre	668
14.4	Propriétés comparées des matériaux composites et des métaux	670
14.5	Bois et bois modifiés	674
14.5.1	Structure du bois	677
14.5.2	Comportement du bois sous contrainte	677
14.5.3	Influence de l'humidité	679
14.5.4	Bois modifiés	680
14.5.4.1	Lamellés-collés	680
14.5.4.2	Contre-plaqués	681
14.5.4.3	Panneaux de particules	681
14.5.4.4	Panneaux de fibres	681

Chapitre 15 Choix des matériaux

15.1	Raisons du choix	683
15.2	Évaluation des besoins	686
15.2.1	Exigences fonctionnelles	686
15.2.2	Exigences technologiques	692
15.2.3	Exigences économiques	694
15.2.4	Exigences sociales	699

Appendice A	Tableau périodique	701
Appendice B	Liste des symboles	703
Appendice C	Unités et facteurs de conversion	705
Appendice D	Constantes physiques	709
Appendice E	Alphabet grec	711
Appendice F	Expressions de la composition d'un mélange (ou alliage) binaire	713
Appendice G	Valeur de la fonction erreur <i>erf</i> (<i>z</i>) selon la valeur de la variable <i>z</i>	717
Appendice H	Facteur géométrique α associé à une fissure	719
Appendice I	Didacticiel (cédérom)	721

Bibliographie	725
---------------------	-----

Index	729
-------------	-----