

Table des matières

AVANT-PROPOS	III
REMERCIEMENTS	V
REMERCIEMENTS POUR LA SECONDE ÉDITION	V

PARTIE 1

MÉTALLURGIE EXTRACTIVE

INTRODUCTION	3
CHAPITRE 1 • LES PROCÉDÉS INDUSTRIELS D'ÉLABORATION DES MÉTAUX ET ALLIAGES	6
1. Introduction	6
2. Élaboration de l'acier (Chapitres I.9. et I.10.)	9
3. Élaboration de l'aluminium (Chapitre I.11.)	11
4. Élaboration du nickel (Chapitre I.12.)	11
5. Élaboration du cuivre (Chapitre I.13.)	14
6. Élaboration du zinc (Chapitre I.14.)	15
7. Élaboration du titane et du zirconium (Chapitre I.15.)	16
8. Les opérations unitaires et les transformations chimiques mises en jeu	18

CHAPITRE 2 • LES OPÉRATIONS UNITAIRES	21
1. Opérations de séparation « solide/solide » et « solide/fluide »	22
2. Opérations de séparation des constituants d'une phase fluide	24
3. Les opérations unitaires chimiques et les réacteurs en pyroméallurgie	26
4. Les opérations unitaires chimiques et les réacteurs en hydroméallurgie	38
CHAPITRE 3 • THERMODYNAMIQUE DES TRANSFORMATIONS PYROMÉTALLURGIQUES (I) : TRANSFORMATION DE PARTICULES SOLIDES	40
1. Données thermodynamiques sur les réactions de formation des oxydes, sulfures, chlorures	40
2. Réduction des oxydes	46
3. Grillage des sulfures	54
4. Chloruration des oxydes	57
CHAPITRE 4 • THERMODYNAMIQUE DES TRANSFORMATIONS PYROMÉTALLURGIQUES (II) : TRANSFORMATIONS EN PHASE LIQUIDE	60
1. Réactions de réduction d'oxydes à l'état liquide et d'affinage de métal ou de matte liquide	60
2. Les réactions de réduction d'oxydes par carbothermie	64
3. Réactions de conversion	64
4. Réactions métal-laitier et matte-laitier	72
5. Réactions de désoxydation	78
6. Thermodynamique des solutions liquides métalliques	79
7. Thermodynamique des mattes	83
8. Thermodynamique des laitiers	84
9. Application : Calcul du taux de désulfuration de l'acier	88
10. Application : décarburation de la fonte	89
11. Réactions de dégazage	90
CHAPITRE 5 • THERMODYNAMIQUE DES TRANSFORMATIONS HYDROMÉTALLURGIQUES	97
1. Les réactions de l'hydroméallurgie	98
2. Bases thermodynamiques	102
CHAPITRE 6 • CINÉTIQUE DES TRANSFORMATIONS (I) DE PARTICULES SOLIDES	107
1. Cinétique des transformations de particules solides	108
2. Cinétique des opérations de précipitation	122
CHAPITRE 7 • CINÉTIQUE DES TRANSFORMATIONS (II) : TRAITEMENT DU MÉTAL LIQUIDE	124
1. Cinétique des réactions d'oxydation directe	124
2. Cinétique des réactions métal-laitier	127
3. Cinétique des opérations de dégazage	130

CHAPITRE 8 • BASES THERMODYNAMIQUES ET CINÉTIQUES DES OPÉRATIONS ÉLECTROMÉTALLURGIQUES	133
1. Introduction - loi de Faraday	133
2. Bases fondamentales des procédés électrométallurgiques	136
3. Électrolyse en solution aqueuse	142
4. L'électroraffinage	146
5. L'électrolyse ignée ou en sels fondus	148
CHAPITRE 9 • LE HAUT FOURNEAU : L'ÉLABORATION DE LA FONTE	150
1. Les filières d'élaboration du métal primaire	150
2. Description du haut-fourneau et de son fonctionnement	152
3. Les phénomènes mis en jeu et les processus élémentaires	156
4. Modélisation et conduite du haut-fourneau	163
CHAPITRE 10 • L'ÉLABORATION DE L'ACIER À PARTIR DE FONTE	172
1. Les étapes de l'affinage et les modes de conversion	172
2. Réactions chimiques mises en jeu	175
3. Cinétique de la décarburation	182
4. Calcul des enfournements	183
5. Les opérations de « métallurgie secondaire »	186
CHAPITRE 11 • L'ÉLABORATION DE L'ALUMINIUM	187
1. Extraction de l'alumine de la bauxite par le procédé Bayer	187
2. Électrolyse de l'alumine	190
3. Métallurgie secondaire/traitement du métal liquide	202
CHAPITRE 12 • L'ÉLABORATION DU NICKEL	204
1. Pyrométallurgie des minerais sulfurés	206
2. Pyrométallurgie des minerais oxydés	208
3. Pyrométallurgie de la matte de nickel	210
4. Électrolyse de la matte de nickel	211
5. Hydro-électrométallurgie de la matte de nickel avec purification par extraction par solvants	212
6. Hydrométallurgie des minerais sulfurés	213
7. Pyrométallurgie de mattes riches en nickel. Procédé nickel-carbonyle	215
CHAPITRE 13 • L'ÉLABORATION DU CUIVRE	218
1. Traitement des minerais sulfurés	219
2. Traitement des minerais oxydés	224

CHAPITRE 14 • L'ÉLABORATION DU ZINC	225
1. Pyrométallurgie	225
2. Hydro-électrométallurgie	229
CHAPITRE 15 • ÉLABORATION DU TITANE ET DU ZIRCONIUM	233
1. Présentation générale	233
2. Analyse des opérations unitaires	234
3. Métallurgie secondaire	239
CHAPITRE 16 • L'ÉLABORATION DU MAGNÉSIUM	240
1. Le procédé électrolytique	241
2. Pyrométallurgie de la magnésie	243

PARTIE 2

MÉTALLURGIE PHYSIQUE

CHAPITRE 1 • COHÉSION, STRUCTURE ET PROPRIÉTÉS PHYSIQUES	251
1. La liaison chimique dans les solides	251
2. Propriétés liées à la liaison chimique	258
3. Organisation atomique et cristallinité	264
4. Structure électronique des métaux	274
5. Propriétés magnétiques	282
CHAPITRE 2 • STRUCTURES CRISTALLINES	290
1. Généralités	290
2. Structure cristalline des corps simples	291
3. Les solutions solides	298
4. Les solutions solides ordonnées	314
5. Les composés intermédiaires	320
CHAPITRE 3 • ÉQUILIBRES THERMODYNAMIQUES ET DIAGRAMMES DE PHASE	332
1. Introduction	332
2. Conditions de l'équilibre	333
3. Détermination des diagrammes de phase	341

4. Modèles thermodynamiques	344
5. Applications à quelques équilibres	347
6. Détermination expérimentale des grandeurs thermodynamiques	353
7. Modèles statistiques	354

CHAPITRE 4 • LES DÉFAUTS PONCTUELS 363

1. Introduction	363
2. Les défauts atomiques ponctuels	364
3. Création de défauts ponctuels	370
4. Étude expérimentale des défauts ponctuels	370
5. Irradiation	376
6. Atomes étrangers	386
7. Défauts ponctuels dans les composés	389

CHAPITRE 5 • LA DIFFUSION 392

1. Introduction	392
2. Sauts atomiques et coefficient de diffusion	394
3. Mécanismes élémentaires de la diffusion	399
4. Autodiffusion par lacunes	402
5. Diffusion dans les alliages et interdiffusion	404
6. Les équations de la diffusion et leurs solutions	412
7. Courts-circuits de diffusion	418
8. Diffusion forcée	422
9. Le frittage	425
10. Annexe : Quelques ordres de grandeur	430

CHAPITRE 6 • DISLOCATIONS ET DÉFAUTS D'EMPILEMENT 432

1. Défauts linéaires : les dislocations	432
2. Défauts plans : défauts d'empilement et dislocations imparfaites	469
3. Rôle chimique des dislocations et des défauts d'empilement	479

CHAPITRE 7 • SURFACES ET INTERFACES 482

Introduction	482
1. Première partie : les surfaces	482
2. Deuxième partie : interfaces solide/solide, joints de grains	490

TRANSFORMATIONS STRUCTURALES

CHAPITRE 1 • INTRODUCTION AUX CHANGEMENTS DE PHASE	511
1. Introduction	511
2. Aspects thermodynamiques	513
3. Aspects cristallographiques	519
4. Aspects morphologiques	522
5. Aspects cinétiques	525
6. Théorie classique de la germination	529
7. Classification des transformations structurales	536
8. Méthodes expérimentales d'étude des cinétiques	540
ANNEXE Conditions aux interfaces	545
CHAPITRE 2 • LA SOLIDIFICATION DES MÉTAUX ET DES ALLIAGES	549
1. Introduction	549
2. Étude expérimentale des diagrammes de phase solide/liquide	549
3. Interprétation thermodynamique	560
4. Cinétique de la solidification	563
5. Coulée des métaux	580
6. Solidification et soudage	582
CHAPITRE 3 • TRANSFORMATIONS POLYMORPHIQUES ET TRANSFORMATIONS ORDRE-DÉSORDRE	594
1. Transformations allotropiques des corps purs	594
2. Influence des éléments d'addition sur les transformations allotropiques	596
3. Influence de l'hydrogène	604
4. Transformations polymorphiques des composés	607
5. Transformations ordre-désordre	609
CHAPITRE 4 • LA PRÉCIPITATION DANS LES SOLUTIONS SOLIDES MÉTALLIQUES	615
1. Étude générale des phénomènes de précipitation	615
2. Cristallographie et morphologie des précipités	627
3. Réactions discontinues ou cellulaires	633
4. Localisation des précipités	642

5. Dissolution des précipités	646
6. Formation de bulles gazeuses et de cavités	647
7. Relations d'orientation dans les alliages Fe-C	651

CHAPITRE 5 • TRANSFORMATIONS MARTENSITIQUES ET BAINITIQUES 652

1. La martensite des aciers	653
2. Généralité des transformations martensitiques	656
3. La transformation allotropique du cobalt	660
4. Aciers et alliages ferreux	661
5. Cristallographie de la transformation	664
6. Thermodynamique de la transformation	667
7. Mémoire mécanique, alliages à mémoire de forme	673
8. Germination de la martensite	675
9. Les transformations bainitiques	676

CHAPITRE 6 • RESTAURATION ET RECRISTALLISATION 681

1. Introduction	681
2. La restauration	683
3. La recristallisation	692
4. Croissance des grains	701
5. Croissance anormale (ou exagérée)	704
6. Effet d'une dispersion de particules	705
7. Textures de recristallisation	708
8. Restauration et recristallisation dynamiques	711
9. Méthodes de simulation de la recristallisation	712

CHAPITRE 7 • LES TRAITEMENTS THERMIQUES DES ALLIAGES INDUSTRIELS 714

1. Diagrammes de transformations	714
2. Les catégories de traitements thermiques	718
3. Traitements thermiques des aciers	724
4. Superalliages	732
5. Traitements thermiques des alliages légers	733
6. Traitements thermiques des alliages de titane	737
7. Traitements de surface	740

MÉTALLURGIE MÉCANIQUE

CHAPITRE 1 • GÉNÉRALITÉS SUR LA DÉFORMATION PLASTIQUE	747
1. Les courbes de déformation	747
2. Description phénoménologique de la plasticité	752
3. De l'éprouvette à la pièce : les sollicitations multiaxiales	755
4. Classification des mécanismes de déformation	759
CHAPITRE 2 • DÉFORMATION À FROID ET MÉCANISMES DE DURCISSEMENT	761
1. Les mécanismes de déformation	761
2. La limite d'élasticité des métaux et alliages	777
3. L'écroutissage des métaux et alliages	789
4. Les instabilités plastiques	795
CHAPITRE 3 • DÉFORMATION À CHAUD	799
1. Les mécanismes spécifiques de la déformation à chaud	799
2. L'essai de fluage	802
3. Modélisation des lois de déformation à chaud	805
4. Superplasticité	807
5. Conclusions	808
CHAPITRE 4 • APPLICATIONS DE LA PLASTICITÉ	809
1. La mise en forme des alliages à l'état solide	809
2. Quelques situations industrielles	824
3. Conclusions	835
CHAPITRE 5 • ENDOMMAGEMENT ET RUPTURE : GÉNÉRALITÉS	836
1. Endommagement et rupture, effets des paramètres de sollicitation	836
2. Stabilité d'un défaut préexistant : notions de mécanique de la rupture	838
3. Endommagement généralisé : notions de mécanique de l'endommagement	842
4. Essais mécaniques spécifiques, nouvelles méthodes de caractérisation	844
CHAPITRE 6 • MÉCANISMES D'ENDOMMAGEMENT EN SOLLICITATION MONOTONE	847
1. Introduction	847
2. Mécanismes élémentaires de la rupture	851

3. Exemples de modélisation des micromécanismes de la rupture	866
4. Approche locale de la rupture	876
5. Conclusions	877
CHAPITRE 7 • MÉCANISMES D'ENDOMMAGEMENT EN FATIGUE	879
1. Spécificité de la sollicitation en fatigue	879
2. Propagation des fissures en fatigue	888
3. Durée de vie des pièces non préfissurées	891
4. Complexité du problème de la fatigue des métaux et alliages	893
CHAPITRE 8 • ÉTUDE DE QUELQUES CAS DE RUPTURE PAR ENDOMMAGEMENT	895
1. Introduction	895
2. Transition ductile/fragile	896
3. Rupture amorcée par des défauts internes	899
4. Rupture brutale amorcée par fatigue	900
5. Les remèdes	902
6. Vers une méthodologie de l'analyse d'avarie	905

PARTIE 5

LA CORROSION

A. LA CORROSION AQUEUSE DES MATÉRIAUX MÉTALLIQUES

CHAPITRE 1 • GÉNÉRALITÉS	913
1. Les différentes formes de corrosion	914
2. Les milieux corrosifs	919
3. Les matériaux	920
CHAPITRE 2 • LA NATURE ÉLECTROCHIMIQUE DE LA CORROSION	922
1. Généralités	922
2. Réactions électrochimiques et corrosion métallique	928
3. Équilibres chimiques et électrochimiques	929
4. Cinétique des réactions électrochimiques	939
5. Électrodes simples et électrodes mixtes	945

CHAPITRE 3 • CORROSION DES MATÉRIAUX MÉTALLIQUES – POTENTIEL ET COURANT DE CORROSION – COUPLAGE GALVANIQUE	948
1. Corrosion et réactions de réduction – potentiel de corrosion - diagramme d'Evans	948
2. Réactions cathodiques	952
3. Couplage galvanique	954
CHAPITRE 4 • CORROSION UNIFORME DISSOLUTION ACTIVE ET PASSIVITÉ	964
1. Dissolution active	964
2. La passivité	966
CHAPITRE 5 • CORROSION LOCALISÉE	974
1. Origines des phénomènes de corrosion localisée. Hétérogénéités locales et piles de corrosion	974
2. Corrosion localisée en milieux chlorurés neutres : corrosion par piqûre et corrosion caverneuse	977
3. Corrosion galvanique	988
4. Corrosion intergranulaire	992
CHAPITRE 6 • LA CORROSION ATMOSPHERIQUE	997
1. Le milieu corrosif	997
2. Morphologie de la corrosion atmosphérique	1000
3. Cinétique de la corrosion atmosphérique	1000
4. La corrosion atmosphérique des aciers non alliés	1001
CHAPITRE 7 • LA LUTTE CONTRE LA CORROSION AQUEUSE	1004
1. Les choix technico-économiques	1005
2. Les méthodes de lutte contre la corrosion	1005
CHAPITRE 8 • L'OXYDATION À CHAUD DES MÉTAUX	1014
1. Introduction	1014
2. Un modèle simple de l'oxydation d'un métal pur	1015
3. Diffusion ambipolaire et théorie de Wagner	1021
4. Oxydation des alliages	1025
5. Contraintes internes et dégradation des pellicules d'oxydes	1030
6. Méthodes d'étude de l'oxydation	1034
7. Atmosphères d'oxydation	1034
8. Protection contre l'oxydation	1035

B. LA FISSURATION DES MATÉRIAUX EN MILIEU CORROSIF

CHAPITRE 9 • CORROSION SOUS CONTRAINTE	1039
1. Caractéristiques de la corrosion sous contrainte	1041
2. Mécanismes de corrosion sous contrainte	1052
3. Étude expérimentale des phénomènes de corrosion sous contrainte	1056
CHAPITRE 10 • FRAGILISATION PAR L'HYDROGÈNE	1058
1. Dommages créés par l'hydrogène dans les matériaux	1058
2. Mécanismes de fragilisation par l'hydrogène	1059
3. Cas des aciers martensitiques et ferritiques	1060
CHAPITRE 11 • FATIGUE-CORROSION	1062
1. Amorçage des fissures de fatigue-corrosion	1063
2. Propagation des fissures en fatigue-corrosion	1063
ANNEXE 1 • RAPPELS DE NOTIONS FONDAMENTALES SUR LES CARACTÉRISTIQUES DES RÉACTIONS CHIMIQUES	1069
1. Grandeurs caractéristiques d'un système et d'une réaction	1070
2. Bases thermodynamiques	1075
3. Bases cinétiques	1083
ANNEXE 2 • RAPPELS D'ÉLASTICITÉ	1089
1. Tenseurs	1089
2. États plans de contrainte et de déformation	1094
BIBLIOGRAPHIE	1097
1. Ouvrages généraux de science des matériaux	1097
2. Ouvrages généraux de métallurgie	1098
3. Thermodynamique	1098
4. Métallurgie extractive	1099
5. Physique des solides	1099
6. Métallurgie physique	1100
7. Métallurgie mécanique	1101
8. Métaux	1102

9.	Procédes de mise en œuvre des métaux	1102
10.	Corrosion	1103
11.	Autres matériaux	1103
12.	Matériaux pour l'électronique	1104
13.	Méthodes de caractérisation	1104
14.	Modélisation et simulations numériques	1105
15.	Histoire	1105
16.	Ouvrages de référence	1105
17.	Collections	1106
INDEX		1109

Matériel protégé par le droit d'auteur