



Traité des **matériaux**

Volume 5, Thermodynamique des **matériaux** : de l'élaboration des **matériaux** à la genèse des **microstructures**

Gérard Lesoult

préface Markus Rettenmayr et Mats Hillert

Lesoult, Gérard

Presses **polytechniques et universitaires romandes**, Lausanne (Suisse)

Traité des **matériaux**, n° 5

ISBN: 978-2-88074-690-2

Table des Matières

Traité des **matériaux**

5. Thermodynamique des **matériaux**

De l'élaboration des **matériaux** à la genèse des **microstructures**

Gérard Lesoult

Presses **polytechniques et universitaires romandes**

Préface	IX
Avant-propos	XI
Introduction générale	XVII
Chapitre 1 Le cycle des matériaux	
1.1 Objectifs	1
1.2 Les matériaux	2
1.3 Cycle d'un matériau: l'acier	11
1.4 Sollicitations et réponses des matériaux	19
1.5 Résumé et conclusions	23
1.6 Références et bibliographie	24
Chapitre 2 Approche thermodynamique des matériaux	
2.1 Objectifs	25
2.2 Description des matériaux	26
2.3 Energie interne et premier principe	30
2.4 Entropie, génération d'entropie et second principe	32
2.5 Evolution thermodynamique et stabilité	37
2.6 La nature moléculaire de la matière	45
2.7 Utilisations de la thermodynamique dans les domaines touchant aux matériaux	57
2.8 Résumé et conclusions	64
2.9 Références et bibliographie	65
Chapitre 3 Éléments de thermodynamique générale	
3.1 Objectifs	67
3.2 Objet et méthode de la thermodynamique	68
3.3 Expressions du premier principe	73
3.4 Expressions du second principe	86
3.5 Phénomènes dissipatifs et irréversibilité	92
3.6 Thermodynamique de l'équilibre	99

3.7Résumé et conclusions	108
3.7Références et bibliographie	110
Chapitre4Phénomènes de transport et phénomènes dissipatifs en volume	
4.1Objectifs	111
4.2Dissipation d'énergie au long du cycle d'un matériau	112
4.3Transferts de chaleur	115
4.4Ecoulements de matière	119
4.5Diffusion chimique	125
4.6Couplages entre phénomènes dissipatifs	142
4.7Déformation des solides cristallisés	145
4.8Résumé et conclusions	152
4.9Références et bibliographie	154
4.10Annexes	155
Chapitre5Structure et propriétés des phases (I): corps purs	
5.1Objectifs	163
5.2Obtention des corps purs	165
5.3Propriétés d'état des corps purs	173
5.4Energie de Gibbs, stabilité des phases et diagrammes d'équilibre de phases	188
5.5Rudiments sur les structures élémentaires	196
5.6Corrélations entre structures et propriétés thermodynamiques	204
5.7Phénomènes dissipatifs, protocoles expérimentaux et transitions vitreuses	208
5.8Fluides à structure moléculaire simple: équation d'état	213
5.9Résumé et conclusions	224
5.10Références et bibliographie	226
Chapitre6Structure et propriétés des phases (II): mélanges	
6.1Objectifs	229
6.2Définition et production de mélanges	230
6.3Propriétés d'état des mélanges	243
6.4Diagrammes binaires «énergie de Gibbs - composition» et stabilité des phases	258
6.5Rudiments sur les structures des mélanges	269
6.6Modèles microscopiques de solutions	277
6.7Résumé et conclusions	295
6.8Références et bibliographie	296
Chapitre7Gradients, surfaces et interfaces	
7.1Objectifs	299
7.2Surfaces et interfaces au long du cycle d'un matériau	299
7.3Hétérogénéités et couches de transition	301
7.4Tension superficielle pour un système unaire	312
7.5Rôle des interfaces sur l'évolution des systèmes unaires polyphasés	327
7.6Adsorption	335

7.7Modèles physico-chimiques de surfaces et d'interfaces	342
7.8Résumé et conclusions	349
7.9Références et bibliographie	351
7.10Annexe	352
Chapitre8Évolution chimique des systèmes polyphasés	
8.1Objectifs	355
8.2Systèmes chimiques polyphasés au long du cycle d'un matériau	356
8.3Etude à l'échelle locale de l'évolution chimique des systèmes polyphasés	359
8.4Etude à l'échelle globale de l'évolution des systèmes polyphasés	360
8.5Outils d'étude généraux et cas classiques d'équilibres polyphasés	375
8.6Evolution des phases dans les matériaux	385
8.7Diagrammes d'équilibre de phases condensées	397
8.8Résumé et conclusions	418
8.9Références et bibliographie	420
Chapitre9Métaux et alliages: élaboration du métal liquide	
9.1Objectifs	423
9.2Filières d'élaboration des métaux et alliages	425
9.3Réduction des minerais et raffinage des métaux et alliages	431
9.4Elaboration de l'acier liquide	441
9.5Elaboration de l'aluminium liquide	448
9.6Diagrammes de phases ternaires en métallurgie d'élaboration	453
9.7Thermodynamique des solutions diluées en métallurgie secondaire	471
9.8Résumé et conclusions	479
9.9Références et bibliographie	480
9.10Annexes	481
Chapitre10Métaux et alliages: coulée et solidification	
10.1Objectifs	497
10.2Principales caractéristiques et qualité des produits coulés	499
10.3Etat solide et état liquide des métaux et alliages	505
10.4Hydrodynamique, thermique et mécanique des procédés de coulée	507
10.5Microstructure et microségrégation	520
10.6Macrostructure et macroségrégation	539
10.7Pièces moulées «monograin», aboutissement de l'évolution des procédés de fonderie de précision	566
10.8Résumé et conclusions	570
10.9Références et bibliographie	572
10.10Annexes	572
Chapitre11Élaboration des verres et céramiques	
11.1Objectifs	581
11.2Définitions et applications des verres et céramiques	582
11.3Propriétés physico-chimiques des céramiques relatives à l'élaboration	591
11.4Elaboration des verres et des céramiques électrofondues	598

11.5Elaboration des céramiques par la voie des solides divisés	610
11.6Principes de frittage	620
11.7Résumé et conclusions	637
11.8Références et bibliographie	638
11.9Annexe	639
Chapitre12Transformations de phases, macrostructures et microstructures	
12.1Objectifs	643
12.2Macrostructures et microstructures associées aux transformations de phases	644
12.3Transitions de phases et transformations de phases	659
12.4Moyens d'étude et de contrôle de la cinétique des transformations de phases	666
12.5Cinétique globale de transformation	677
12.6Coulée, solidification et cinétique de cristallisation	682
12.7Genèse des microstructures: méthodes expérimentales et approches théoriques	687
12.8Résumé et conclusions	695
12.9Références et bibliographie	696
Chapitre13Aspects cinétiques de la croissance cristalline	
13.1Objectifs	699
13.2Croissance cristalline et transferts de masse entre phases	701
13.3Forces motrices et phénomènes dissipatifs	705
13.4Structure atomique d'une interface cristal/fluide	722
13.5Cinétiques atomiques de cristallisation d'une substance pure	728
13.6Réactions interfaciales couplées et piégeage du soluté	736
13.7Croissance libre: exemples et solutions classiques	743
13.8Croissance forcée - Surfusion de croissance - Surfusion chimique	762
13.9Résumé et conclusions	770
13.10Références et bibliographie	772
13.11Annexes	772
Chapitre14Germination et décomposition spinodale	
14.1Objectifs	783
14.2Exemples d'apparition de nouvelles phases dans le cycle d'un matériau	784
14.3Etats métastables et états instables: observations expérimentales	788
14.4Condensation d'une vapeur pure - Fluctuations de phases discontinues	797
14.5Germination de cristaux à partir d'un mélange liquide	810
14.6Germination dans le solide	825
14.7Décomposition spinodale - Fluctuations de phases continues	843
14.8Contrôle de la macrostructure de grains par inoculation en fonderie	857
14.9Résumé et conclusions	869
14.9Références et bibliographie	871
Chapitre15Microstructures polyphasées et croissance polyphasée couplée	
15.1Objectifs	873

15.2Exemples de relations: microstructures polyphasées - propriétés	874
15.3Spécificités des microstructures régulières et des transformations correspondantes	881
15.4Analyse thermodynamique de la transformation eutectique en régime permanent	890
15.5Estimation des différentes contributions à la génération d'entropie lors d'une transformation eutectique en régime permanent	899
15.6Conditions réelles de transformation	905
15.7Conditions d'obtention de structures polyphasées régulières et parfaites	917
15.8Microstructures diphasées des fontes à base aluminium et à base fer	924
15.9Résumé et conclusions	938
15.10Références et bibliographie	940
15.11Annexe	942
Chapitre16Microstructures: émergence et sélection	
16.1Objectifs	951
16.2Sélection des microstructures dans le cycle des matériaux	953
16.3Morphologies de croissance libre dans un liquide	958
16.4Croissance libre monophasée dendritique	975
16.5Croissance forcée monophasée	991
16.6Sélection de microstructures, critères <i>ad hoc</i> et critères thermodynamiques	1018
16.7Emergence et sélection de structures dissipatives et de microstructures	1036
16.8Conclusion générales: utilité et limites de la thermodynamique	1044
16.9Références et bibliographie	1047
Notations	1049
Index analytique	1055