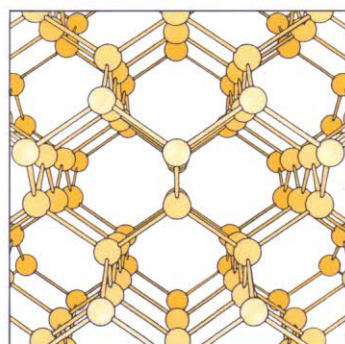


# **TRAITÉ DES MATÉRIAUX**

# 5



## **THERMODYNAMIQUE DES MATÉRIAUX**

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

*Gérard Lesoult*

---

# TABLE DES MATIÈRES

	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
	3.7 Résumé et conclusions.....	108
	3.7 Références et bibliographie.....	110

CHAPITRE 4	PHÉNOMÈNES DE TRANSPORT ET PHÉNOMÈNES DISSIPATIFS EN VOLUME	
4.1	Objectifs .....	111
4.2	Dissipation d'énergie au long du cycle d'un matériau.....	112
4.3	Transferts de chaleur .....	115
4.4	Ecoulements de matière .....	119
4.5	Diffusion chimique.....	125
4.6	Couplages entre phénomènes dissipatifs.....	142
4.7	Déformation des solides cristallisés .....	145
4.8	Résumé et conclusions .....	152
4.9	Références et bibliographie.....	154
4.10	Annexes.....	155
CHAPITRE 5	STRUCTURE ET PROPRIÉTÉS DES PHASES (I): CORPS PURS	
5.1	Objectifs .....	163
5.2	Obtention des corps purs.....	165
5.3	Propriétés d'état des corps purs .....	173
5.4	Energie de Gibbs, stabilité des phases et diagrammes d'équilibre de phases.....	188
5.5	Rudiments sur les structures élémentaires .....	196
5.6	Corrélations entre structures et propriétés thermodynamiques .....	204
5.7	Phénomènes dissipatifs, protocoles expérimentaux et transitions vitreuses.....	208
5.8	Fluides à structure moléculaire simple: équation d'état ...	213
5.9	Résumé et conclusions .....	224
5.10	Références et bibliographie.....	226
CHAPITRE 6	STRUCTURE ET PROPRIÉTÉS DES PHASES (II): MÉLANGES	
6.1	Objectifs .....	229
6.2	Définition et production de mélanges .....	230
6.3	Propriétés d'état des mélanges .....	243
6.4	Diagrammes binaires «énergie de Gibbs – composition» et stabilité des phases .....	258
6.5	Rudiments sur les structures des mélanges .....	269
6.6	Modèles microscopiques de solutions.....	277
6.7	Résumé et conclusions .....	295
6.8	Références et bibliographie.....	296
CHAPITRE 7	GRADIENTS, SURFACES ET INTERFACES	
7.1	Objectifs .....	299
7.2	Surfaces et interfaces au long du cycle d'un matériau.....	299
7.3	Hétérogénéités et couches de transition .....	301
7.4	Tension superficielle pour un système unaire .....	312

	7.5 Rôle des interfaces sur l'évolution des systèmes unaires polyphasés.....	327
	7.6 Adsorption.....	335
	7.7 Modèles physico-chimiques de surfaces et d'interfaces ...	342
	7.8 Résumé et conclusions.....	349
	7.9 Références et bibliographie.....	351
	7.10 Annexe.....	352
CHAPITRE 8	<b>ÉVOLUTION CHIMIQUE DES SYSTÈMES POLYPHASÉS</b>	
	8.1 Objectifs.....	355
	8.2 Systèmes chimiques polyphasés au long du cycle d'un matériau.....	356
	8.3 Etude à l'échelle locale de l'évolution chimique des systèmes polyphasés.....	359
	8.4 Etude à l'échelle globale de l'évolution des systèmes polyphasés.....	360
	8.5 Outils d'étude généraux et cas classiques d'équilibres polyphasés.....	375
	8.6 Evolution des phases dans les matériaux.....	385
	8.7 Diagrammes d'équilibre de phases condensées.....	397
	8.8 Résumé et conclusions.....	418
	8.9 Références et bibliographie.....	420
CHAPITRE 9	<b>MÉTAUX ET ALLIAGES : ÉLABORATION DU MÉTAL LIQUIDE</b>	
	9.1 Objectifs.....	423
	9.2 Filières d'élaboration des métaux et alliages.....	425
	9.3 Réduction des minerais et raffinage des métaux et alliages.....	431
	9.4 Elaboration de l'acier liquide.....	441
	9.5 Elaboration de l'aluminium liquide.....	448
	9.6 Diagrammes de phases ternaires en métallurgie d'élaboration.....	453
	9.7 Thermodynamique des solutions diluées en métallurgie secondaire.....	471
	9.8 Résumé et conclusions.....	479
	9.9 Références et bibliographie.....	480
	9.10 Annexes.....	481
CHAPITRE 10	<b>MÉTAUX ET ALLIAGES : COULÉE ET SOLIDIFICATION</b>	
	10.1 Objectifs.....	497
	10.2 Principales caractéristiques et qualité des produits coulés	499
	10.3 Etat solide et état liquide des métaux et alliages.....	505
	10.4 Hydrodynamique, thermique et mécanique des procédés de coulée.....	507
	10.5 Microstructure et microségrégation.....	520

	10.6 Macrostructure et macroségrégation.....	539
	10.7 Pièces moulées « monograin », aboutissement de l'évolution des procédés de fonderie de précision .....	566
	10.8 Résumé et conclusions.....	570
	10.9 Références et bibliographie.....	572
	10.10 Annexes.....	572
CHAPITRE 11	ÉLABORATION DES VERRES ET CÉRAMIQUES	
	11.1 Objectifs.....	581
	11.2 Définitions et applications des verres et céramiques .....	582
	11.3 Propriétés physico-chimiques des céramiques relatives à l'élaboration .....	591
	11.4 Elaboration des verres et des céramiques électrofondues	598
	11.5 Elaboration des céramiques par la voie des solides divisés .....	610
	11.6 Principes de frittage .....	620
	11.7 Résumé et conclusions.....	637
	11.8 Références et bibliographie.....	638
	11.9 Annexe .....	639
CHAPITRE 12	TRANSFORMATIONS DE PHASES, MACROSTRUCTURES ET MICROSTRUCTURES	
	12.1 Objectifs.....	643
	12.2 Macrostructures et microstructures associées aux transformations de phases .....	644
	12.3 Transitions de phases et transformations de phases.....	659
	12.4 Moyens d'étude et de contrôle de la cinétique des transformations de phases.....	666
	12.5 Cinétique globale de transformation.....	677
	12.6 Coulée, solidification et cinétique de cristallisation .....	682
	12.7 Genèse des microstructures : méthodes expérimentales et approches théoriques.....	687
	12.8 Résumé et conclusions.....	695
	12.9 Références et bibliographie.....	696
CHAPITRE 13	ASPECTS CINÉTIQUES DE LA CROISSANCE CRISTALLINE	
	13.1 Objectifs.....	699
	13.2 Croissance cristalline et transferts de masse entre phases	701
	13.3 Forces motrices et phénomènes dissipatifs.....	705
	13.4 Structure atomique d'une interface cristal / fluide.....	722
	13.5 Cinétiques atomiques de cristallisation d'une substance pure .....	728
	13.6 Réactions interfaciales couplées et piégeage du soluté....	736
	13.7 Croissance libre : exemples et solutions classiques .....	743
	13.8 Croissance forcée – Surfusion de croissance – Surfusion chimique .....	762

	13.9	Résumé et conclusions.....	770
	13.10	Références et bibliographie.....	772
	13.11	Annexes.....	772
CHAPITRE 14	GERMINATION ET DÉCOMPOSITION SPINODALE		
	14.1	Objectifs.....	783
	14.2	Exemples d'apparition de nouvelles phases dans le cycle d'un matériau .....	784
	14.3	Etats métastables et états instables : observations expérimentales .....	788
	14.4	Condensation d'une vapeur pure – Fluctuations de phases discontinues .....	797
	14.5	Germination de cristaux à partir d'un mélange liquide ...	810
	14.6	Germination dans le solide.....	825
	14.7	Décomposition spinodale – Fluctuations de phases continues .....	843
	14.8	Contrôle de la macrostructure de grains par inoculation en fonderie .....	857
	14.9	Résumé et conclusions.....	869
	14.9	Références et bibliographie.....	871
CHAPITRE 15	MICROSTRUCTURES POLYPHASÉES ET CROISSANCE POLYPHASÉE COUPLÉE		
	15.1	Objectifs.....	873
	15.2	Exemples de relations : microstructures polyphasées – propriétés.....	874
	15.3	Spécificités des microstructures régulières et des transformations correspondantes .....	881
	15.4	Analyse thermodynamique de la transformation eutectique en régime permanent .....	890
	15.5	Estimation des différentes contributions à la génération d'entropie lors d'une transformation eutectique en régime permanent.....	899
	15.6	Conditions réelles de transformation .....	905
	15.7	Conditions d'obtention de structures polyphasées régulières et parfaites .....	917
	15.8	Microstructures diphasées des fontes à base aluminium et à base fer .....	924
	15.9	Résumé et conclusions.....	938
	15.10	Références et bibliographie.....	940
	15.11	Annexe .....	942
CHAPITRE 16	MICROSTRUCTURES : ÉMERGENCE ET SÉLECTION		
	16.1	Objectifs.....	951
	16.2	Sélection des microstructures dans le cycle des matériaux .....	953

---

16.3	Morphologies de croissance libre dans un liquide.....	958
16.4	Croissance libre monophasée dendritique .....	975
16.5	Croissance forcée monophasée .....	991
16.6	Sélection de microstructures, critères <i>ad hoc</i> et critères thermodynamiques.....	1018
16.7	Emergence et sélection de structures dissipatives et de microstructures .....	1036
16.8	Conclusion générales : utilité et limites de la thermodynamique.....	1044
16.9	Références et bibliographie.....	1047
	NOTATIONS.....	1049
	INDEX ANALYTIQUE.....	1055