
PRÉSENTATION DU TRAITÉ DES MATÉRIAUX

Les matériaux utilisés pour la fabrication artisanale ou industrielle d'objets, de produits et de systèmes ainsi que pour la réalisation de constructions et d'équipements ont de tout temps défini le niveau de notre civilisation technique. La réalisation des objectifs communs de notre monde en développement est en grande partie tributaire de la mise au point de matériaux et de procédés de transformation et d'assemblage nouveaux, présentant des performances inédites ou améliorées.

La réussite des efforts entrepris pour le développement de matériaux adaptés aux besoins de demain dépend d'une intégration de connaissances précises, de méthodes théoriques de modélisation et de prévision du comportement, ainsi que d'installations techniques sophistiquées. C'est ainsi que le domaine multidisciplinaire science et génie des matériaux est devenu un pilier indispensable du progrès de toute technologie dynamique.

Le Traité des Matériaux est une série coordonnée de 20 volumes dont l'objectif est tout d'abord pédagogique: il s'adresse prioritairement aux étudiants et aux enseignants des universités et des hautes écoles des différentes disciplines concernées. En outre, les auteurs et les éditeurs souhaitent répondre aux besoins des ingénieurs et des scientifiques qui veulent mettre à jour leurs connaissances et, d'une façon générale, à tous ceux qui ont envie de mieux comprendre les propriétés et le comportement des matériaux qui sont intimement liés à notre existence.

Dans cette optique, certains ouvrages de ce traité sont consacrés aux matériaux spécifiques, tandis que d'autres abordent les phénomènes et les techniques applicables à l'ensemble des familles de matériaux. De plus, la discussion des influences conjuguées des matériaux tels quels et des procédés de leur mise en œuvre et de leur assemblage est une ligne directrice de ce traité. Enfin, une attention particulière est accordée à l'avancement récent des matériaux «fonctionnels» par rapport aux matériaux «structuraux», sans pour autant nier la prédominance économique de ces derniers, notamment de ceux dits «à grande diffusion».

Le Traité des Matériaux rassemble des auteurs qui sont enseignants et chercheurs de différentes universités, hautes écoles et institutions de recherche, publiques et privées. La plupart d'entre eux sont d'origine francophone, mais la participation à cette entreprise d'experts anglo- et germanophones est considérée comme une contribution bienvenue dans le cadre de l'europanisation de l'enseignement en science et génie des matériaux.

Le Comité Scientifique responsable de cette collection est composé de :

Bernhard Ilschner, Lausanne (Président)

Christian Janot, Grenoble et Rome

Gérard Maeder, Paris

Alain Mocellin, Nancy

Robert Schirrer, Strasbourg

LE TRAITÉ DES MATÉRIAUX EN VINGT VOLUMES

1. INTRODUCTION
À LA SCIENCE DES MATÉRIAUX
 2. CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE DES MATÉRIAUX I:
PROPRIÉTÉS PHYSIQUES, THERMIQUES, MÉCANIQUES
 3. CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE DES MATÉRIAUX II:
ANALYSE PAR RAYONS X, ÉLECTRONS ET NEUTRONS
 4. ANALYSE ET TECHNOLOGIE DES SURFACES
 5. THERMODYNAMIQUE
ET ÉVOLUTION DES MATÉRIAUX
 6. PHÉNOMÈNES DE TRANSPORT ASSOCIÉS
À L'ÉLABORATION ET AU TRAITEMENT DES MATÉRIAUX
 7. COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX
DANS LES SYSTÈMES BIOLOGIQUES
 8. PHYSIQUE DES MATÉRIAUX
 9. DÉFORMATION ET RÉSISTANCE
DES MATÉRIAUX
 10. MODÉLISATION NUMÉRIQUE
EN SCIENCE ET GÉNIE DES MATÉRIAUX
 11. MÉTAUX ET ALLIAGES:
CONSTITUTION, TECHNOLOGIE ET APPLICATIONS
 12. CORROSION ET CHIMIE DE SURFACES DES MÉTAUX
 13. CHIMIE DES POLYMÈRES:
SYNTHÈSES, RÉACTIONS ET DÉGRADATIONS
 14. MATÉRIAUX POLYMÈRES: PROPRIÉTÉS
MÉCANIQUES ET PHYSIQUES. PRINCIPE DE MISE EN ŒUVRE
 15. MATÉRIAUX COMPOSITES À MATRICE ORGANIQUE
 16. LES CÉRAMIQUES ET LE VERRE:
PRINCIPES ET TECHNIQUES D'ÉLABORATION
 17. MATÉRIAUX
DE CONSTRUCTION
 18. PHYSIQUE ET TECHNOLOGIE DES SEMICONDUCTEURS
 19. MATÉRIAUX ÉMERGENTS
 20. SÉLECTION DES MATÉRIAUX
ET DES PROCÉDÉS DE MISE EN ŒUVRE
-

PRÉFACE

Une des révolutions qui lasse, à force d'être silencieusement permanente et peu spectaculaire, est bien celle que connaissent actuellement les matériaux. Pourtant, pour en constater les effets, il suffit de songer à ce qu'aurait été la mutation technologique actuelle sans le dénominateur commun que ces matériaux constituent pour tout développement industriel important, quel que soit le secteur concerné. En fait, non moins d'un quart de l'activité économique des pays industrialisés est rattaché aux matériaux.

Bien plus discret encore est l'effort intellectuel consenti par des équipes de chercheurs dans le domaine de l'état solide depuis l'avènement de la mécanique quantique des années 20. Leurs travaux nous permettent, actuellement, de jongler avec la structure microscopique de la matière, tant organique qu'inorganique, pour créer de nouveaux solides, ou pour transformer radicalement ceux qui faisaient partie du lot quotidien. Actuellement, on est sur le point d'appréhender globalement les divers types de matériaux à partir de concepts liés, d'une part à la structure de l'atome et de la molécule, et d'autre part à la microstructure. Dans certains cas, des calculs *ab initio* permettent de comprendre et de prévoir les propriétés macroscopiques. C'est le cas notamment en ce qui concerne la structure électronique de quelques solides inorganiques, suivis de près par les organiques. Bien sûr, l'évolution des méthodes de calcul et de la capacité des ordinateurs n'est pas étrangère à ces dernières réalisations. Mais ces puissants outils de l'informatique ne sont-ils pas eux-mêmes dans une large mesure tributaires du développement des matériaux ?

Il est clair qu'un enseignement unifié en science des matériaux est indispensable, et ce d'autant plus qu'à l'heure actuelle, l'empirisme est fortement bousculé par la dynamique de l'innovation scientifique dans ce domaine. Cet ouvrage, qui se veut être une introduction à un traité, s'inscrit bien dans cette vision globale. On y retrouve un savant équilibre entre les notions fondamentales et les applications, le tout illustré de tableaux concis et d'exemples concrets bien choisis. De même, les trois grandes classes de matériaux, suivant la classification adoptée par les auteurs (métaux, polymères organiques, céramiques), y sont traitées suivant une même démarche. Le lien est établi, quand cela est possible, entre le comportement macroscopique de la matière et les propriétés à l'échelle de l'atome en passant par la microstructure. Les concepts de la thermodynamique sont heureusement omniprésents pour décrire la situation lorsqu'elle échappe à une prévision plus microscopique.

La tournure didactique de ce traité convient parfaitement à des étudiants ingénieurs, physiciens ou chimistes qui ne se destinent pas à une spécialisation en matériaux mais qui désirent, néanmoins, s'ouvrir à cette discipline. L'ouvrage devrait aussi être très apprécié par les spécialistes d'un domaine particulier de la science des matériaux désirant avoir une vue d'ensemble sur le sujet et situer leur activité dans un

contexte plus large. Il sera également très utile à ceux qui ont quitté les bancs de l'Université depuis plus d'une décennie.

Préface à la troisième édition

Lorsque près d'une décennie plus tard on revisite un ouvrage, les premières questions qui nous viennent à l'esprit sont de savoir s'il est toujours d'actualité, si certaines sections ne sont pas dépassées, et s'il sera à même de réaliser ses objectifs durant au moins une décennie encore. Ces questions sont d'autant plus pertinentes que le développement de la science des matériaux n'a pas connu de répit durant cette période, mais que, bien au contraire, il a poursuivi sur sa lancée de manière foudroyante. Pour confirmer cette évolution, en la situant au plan pratique, certains économistes n'hésitent pas aujourd'hui à affirmer qu'au début du prochain millénaire, une fraction importante de la croissance économique prévue sera redevable aux technologies nouvelles, les matériaux nouveaux occupant une place de choix dans leurs prévisions.

Aux deux premières questions je réponds oui sans hésitation. Quant à savoir si cette introduction à la science des matériaux a fait sa cure de rajeunissement, je répondrai aussi par l'affirmative. En effet, cette nouvelle édition a été avantageusement remaniée, parfois profondément (e.g. chapitre 14), les exemples illustratifs mis à jour, voire remplacés.

Confirmant le succès qu'il a déjà connu, tout porte à croire que de nouvelles générations d'étudiants ingénieurs, physiciens et chimistes et certains de leurs aînés pourront aussi bénéficier de cet ouvrage didactique de grande qualité.

Jean-Paul Issi

Professeur à l'Université catholique de Louvain

AVANT-PROPOS

Cet ouvrage, qui constitue une introduction à un Traité sur la Science des Matériaux, s'inscrit dans une vision globale et unifiée de cette discipline.

Ce livre s'adresse non seulement aux étudiants mais également à tout ingénieur ou tout scientifique qui désire acquérir les bases de la science des matériaux. L'ouvrage a pour objectif de présenter de manière synthétique les caractéristiques générales et les propriétés des principaux matériaux.

Un effort a été fait en vue d'unifier les théories et d'intégrer les particularités de l'ensemble des matériaux, en évitant de les isoler en catégories comme c'est souvent le cas dans les livres antérieurs.

Une telle approche, qui fait actuellement défaut en langue française, devrait contribuer à ouvrir les frontières existant encore entre les métaux, les polymères organiques et les céramiques.

L'ouvrage présente la diversité des structures et des microstructures des matériaux, leur comportement à des sollicitations ou des environnements divers, avec un accent particulier sur les propriétés mécaniques. Les propriétés physiques ont été regroupées dans un chapitre synthétique.

Pour faciliter la lecture et illustrer les principes de base, un certain nombre de résultats sont donnés sous forme d'exemples illustratifs repris à la fin de chaque chapitre .

Trois grands sujets sont abordés dans cet ouvrage:

- une description élémentaire des principaux matériaux (métaux, céramiques et polymères organiques);
- une étude succincte des défauts de la structure cristalline, des équilibres et des transformations de phases avec introduction de la notion d'alliage et description des microstructures;
- une analyse du comportement des matériaux sous contraintes mécaniques et lors de la rupture.

On termine par une étude des propriétés physiques, de la dégradation et de la corrosion et par une description des principaux matériaux composites.

Conventions

Chaque chapitre est repéré par un nombre (chapitre 8) et divisé en sections repérées par deux nombres séparés par un point (section 8.2). Chaque section est divisée en paragraphes repérés par trois nombres séparés par deux points (§ 8.2.3).

Un terme apparaît en italique gras la première fois qu'il est défini dans le texte. Il est repris dans l'index. Un passage important est mis en évidence en utilisant l'italique maigre.

Les équations sont numérotées par chapitre et repérées par deux nombres placés entre parenthèses et séparés par un point (8.14). Les figures et les tableaux sont également numérotés par chapitre et indiqués par deux nombres. Ces deux nombres sont précédés, selon le cas, par Fig. ou Tableau. Il n'y a donc pas de numérotation séparée pour ces deux types d'éléments.

La bibliographie particulière à chaque chapitre est présentée par ordre alphabétique en fin du chapitre. La bibliographie générale figure en fin de l'ouvrage. Une liste des principaux symboles est également reprise en fin de l'ouvrage.

Remerciements

Nous tenons à remercier très chaleureusement Monsieur W. Form, Professeur honoraire à l'Université de Neuchâtel pour les nombreuses heures qu'il a passées à relire et à critiquer les manuscrits successifs de cet ouvrage et pour l'aide qu'il nous a apportée pour la préparation de la troisième édition.

Notre gratitude va également à A. Kelly, Professeur, CBE, FEng, FIM, FRS, à M. Rappaz, Professeur à l'E.P.F.L et à L. Haenny, Professeur à l'École d'ingénieurs de Genève pour leurs critiques constructives.

Nous remercions vivement les collègues et les membres de l'E.P.F.L. et de l'U.C.L. ainsi que diverses personnalités du monde universitaire et industriel qui ont accepté de contribuer ou de relire certaines parties du manuscrit, en particulier: R. E. Bauman, J. Bauvois, W. Benoit, J. J. Biebuick, M. Gerl (†), H. Hofmann, Y. Houst, Ch. Huet, B. Ilschner, J.P. Issi, Y. Kaenel, D. Landolt, J. Lemaître, A. Mocellin, J. B. Nagy, Y. Reverchon, G. Smets (†) et J. Vogt.

Ont collaboré à ce volume: Sonia Aebischer (dactylographie du manuscrit initial), Frans Gerardis et Elsbeth Schlosser (exécution des dessins), Flavia Milliet (correction des épreuves).

TABLE DES MATIÈRES

PRÉSENTATION DU TRAITÉ DES MATÉRIAUX	V
PRÉFACE	VI
AVANT-PROPOS	IX
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	
1.1 Objectifs	1
1.2 Les matériaux	1
1.3 La science des matériaux	7
1.4 Cycle des matériaux et ressources	10
1.5 Résumé et conclusions	14
1.6 Exemple illustratif: une hanche artificielle	15
1.7 Exercices	18
1.8 Références et lectures complémentaires	18
CHAPITRE 2 ATOME, MOLÉCULE ET LIAISON CHIMIQUE	
2.1 Objectifs	21
2.2 Structure de l'atome.....	21
2.3 La liaison	26
2.4 Forces de cohésion interne	48
2.5 Résumé et conclusions	51
2.6 Exemple illustratif: fibres et nanotubes de carbone.....	52
2.7 Exercices	57
2.8 Références et lectures complémentaires	57
CHAPITRE 3 STRUCTURE ET ORGANISATION DES SOLIDES	
3.1 Objectifs	59
3.2 États physiques des matériaux	59
3.3 Description de l'état cristallin	64
3.4 Mise en évidence de la structure cristalline	74
3.5 Résumé et conclusions	79
3.6 Exemple illustratif: le monocristal de silicium, centre névralgique de tout ordinateur	80
3.7 Exercices	82
3.8 Références et lectures complémentaires	83

CHAPITRE 4	STRUCTURE DES PRINCIPAUX MATÉRIAUX	
4.1	Objectifs	85
4.2	Structure compacte des métaux	85
4.3	Organisation des cristaux ioniques	90
4.4	Structure des solides à liaisons covalentes et covalentes polaires	92
4.5	Résumé et conclusions	97
4.6	Exemple illustratif: les verres métalliques, matériaux pour les technologies nouvelles	98
4.7	Exercices	100
4.8	Références et lectures complémentaires	100
CHAPITRE 5	PRINCIPAUX MATÉRIAUX ORGANIQUES ET CÉRAMIQUES	
5.1	Objectifs	103
5.2	Les polymères organiques	103
5.3	Quelques grandes classes de céramiques	120
5.4	Résumé et conclusions	130
5.5	Exemple illustratif: les lentilles de contact 10 mg pour corriger la vue	131
5.6	Exercices	136
5.7	Références et lectures complémentaires	137
CHAPITRE 6	COMPORTEMENT ÉLASTIQUE DU SOLIDE	
6.1	Objectifs	139
6.2	Déformation élastique des solides	139
6.3	Thermodynamique et origine atomique de l'élasticité	145
6.4	Relation entre contrainte et déformation dans les matériaux viscoélastiques	158
6.5	Résumé et conclusions	166
6.6	Exemple illustratif: l'avion ultraléger ou le rêve d'Icare réalisé	166
6.7	Exercices	169
6.8	Références et lectures complémentaires	170
CHAPITRE 7	DÉFAUTS DE LA STRUCTURE CRISTALLINE	
7.1	Objectifs	171
7.2	Défauts ponctuels	171
7.3	Défauts linéaires ou dislocations	178
7.4	Défauts bidimensionnels	187

7.5	Résumé et conclusions	190
7.6	Exemple illustratif: défauts structuraux des films de diamant	192
7.7	Exercices	194
7.8	Références et lectures complémentaires	195
CHAPITRE 8 ALLIAGES ET DIAGRAMMES DE PHASES		
8.1	Objectifs	197
8.2	Généralités	197
8.3	Systèmes à un constituant	202
8.4	Équilibre de phases dans les systèmes binaires	210
8.5	Exemples d'application	222
8.6	Résumé et conclusions	229
8.7	Exemple illustratif: comment traiter la carie dentaire ?	230
8.8	Exercices	233
8.9	Références et lectures complémentaires	235
CHAPITRE 9 TRANSFORMATIONS DE PHASES		
9.1	Objectifs	237
9.2	Diffusion	237
9.3	Transformations de phases	243
9.4	Résumé et conclusions	266
9.5	Exemple illustratif: tempête de neige dans un lingot.....	267
9.6	Exercices	270
9.7	Références et lectures complémentaires	271
CHAPITRE 10 MICROSTRUCTURES		
10.1	Objectifs	273
10.2	Observation des microstructures	273
10.3	Principales microstructures des matériaux.....	277
10.4	Résumé et conclusions	291
10.5	Exemple illustratif: le laser, un outil pour l'industrie automobile	291
10.6	Exercices	294
10.7	Références et lectures complémentaires	297
CHAPITRE 11 COMPORTEMENT DES MATÉRIAUX EN TRACTION		
11.1	Objectifs	299
11.2	Propriétés mécaniques en traction	299
11.3	Résumé et conclusions	313

11.4	Exemple illustratif: câbles de téléphérique	314
11.5	Exercices	317
11.6	Références et lectures complémentaires	318
CHAPITRE 12 FACTEURS INFLUENÇANT LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES		
12.1	Objectifs	319
12.2	Notion de basse et de haute températures	320
12.3	Déformation plastique des matériaux à basse température	321
12.4	Limite d'élasticité et mécanismes de renforcement des solides cristallins	332
12.5	Facteurs influençant la résistance mécanique des polymères organiques	344
12.6	Déformation à haute température.....	350
12.7	Résumé et conclusions	360
12.8	Exemple illustratif: monocristal pour turbines à gaz	361
12.9	Exercices	365
12.10	Références et lectures complémentaires	367
CHAPITRE 13 RUPTURE ET TÉNACITÉ		
13.1	Objectifs	369
13.2	La rupture fragile	370
13.3	La rupture ductile.....	378
13.4	Résumé et conclusions	382
13.5	Exemple illustratif: l'affaire Comet.....	383
13.6	Exercices	386
13.7	Références et lectures complémentaires	388
CHAPITRE 14 PROPRIÉTÉS PHYSIQUES		
14.1	Objectifs	389
14.2	Conductivité électrique	389
14.3	Conductivité thermique	403
14.4	Propriétés magnétiques.....	409
14.5	Propriétés optiques	417
14.6	Résumé et conclusions	428
14.7	Exemple illustratif: applications innombrables pour aimants permanents	429
14.8	Exercices	431
14.9	Références et lectures complémentaires	432

CHAPITRE 15 DÉGRADATION, CORROSION, VIEILLISSEMENT	
15.1	Objectifs435
15.2	Formes diverses du vieillissement435
15.3	Corrosion des métaux437
15.4	Dégradation des polymères445
15.5	Résistance des céramiques à la corrosion chimique.....452
15.6	Résumé et conclusions452
15.7	Exemple illustratif: corrosion du béton armé par les sels de déneigement ou par immersion en milieu marin453
15.8	Exercices455
15.9	Références et lectures complémentaires456
CHAPITRE 16 MATÉRIAUX COMPOSITES	
16.1	Objectifs457
16.2	Introduction457
16.3	Matériaux composites à base de fibres458
16.4	Structures sandwiches468
16.5	Résumé et conclusions470
16.6	Exemple illustratif: matériaux pour skis de l'an 2000470
16.7	Exercices476
16.8	Références et lectures complémentaires477
CHAPITRE 17 ANNEXES	
17.1	Masse volumique et propriétés mécaniques des principaux matériaux479
17.2	Rayons atomiques en fonction des différents types de liaisons chimiques480
17.3	Principaux matériaux polymères481
17.4	Classification des principales céramiques483
17.5	Références484
BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE485	
LISTE DES SYMBOLES487	
INDEX ANALYTIQUE491	
SOURCE DES ILLUSTRATIONS.....499	
BIOGRAPHIE DES AUTEURS500	