

AIDE-MÉMOIRE

Science et génie des matériaux

Michel **Dupeux**
Joël **Courbon**

AIDE-MÉMOIRE

Science et génie des matériaux

5^e édition

DUNOD

Illustration de couverture :
© studiovin - Shutterstock.com

Mise en page : Belle Page

© Dunod, 2004, 2008, 2013, 2015, 2018, 2023

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-085695-4

Avant-propos

Cinq éditions successives, bientôt vingt ans d'existence : cet aide-mémoire semble avoir trouvé une place pérenne parmi les ouvrages de référence pour tous ceux qui étudient, enseignent ou mettent en pratique les matériaux au quotidien. Cette longévité confirme que son contenu répond certainement aux besoins et aux interrogations de ses lecteurs. Les matériaux ont accompagné l'Humanité depuis son origine, depuis le premier bâton, le premier caillou ramassé par un Hominine jusqu'aux réalisations actuelles les plus innovantes : même l'Intelligence Artificielle ou les réseaux de communication mondiaux reposent sur l'activation de circuits micro-électroniques bien matériels et concrets.

L'étude des matériaux, de leur structure, de leurs propriétés et de leur mise en œuvre est une discipline passionnante et inépuisable, qui va de la géopolitique des matières premières jusqu'au design industriel en passant par la physico-chimie du solide. Elle exige cependant de demeurer en prise directe avec la recherche académique et industrielle, aussi bien que de l'innovation technique et de l'évolution économique et socio-culturelle. C'est pourquoi la présente édition a été révisée à quatre mains, préparant ainsi un passage de relais en toute confiance pour les éditions à venir.

Les objectifs de simplicité et de réalisme utilitaire qui ont fait l'attrait des éditions précédentes sont ici reconduits :

Les notions physiques et chimiques fondamentales qui permettent de comprendre de quoi sont constitués les matériaux et comment ils « fonctionnent » ;

La description quantifiable des propriétés qui font l'intérêt des matériaux ;

Pour chaque grande classe de matériaux, des informations pratiques sur leur origine, leur identification, leurs propriétés typiques et les techniques de leur mise en œuvre ;

Des considérations de synthèse sur l'optimisation des compromis entre la fonction recherchée, le matériau travaillé et la technique de production employée pour un produit fini donné ;

Une bibliographie substantielle pour l'approfondissement, ainsi que des annexes et index facilitant l'accès rapide aux informations.

Tout ceci avec toujours un maximum de données pratiques concrètes.

En plus de quelques actualisations indispensables, vous trouverez dans cette édition des notions supplémentaires sur l'élaboration des matériaux ainsi que sur la démarche d'Analyse du Cycle de Vie qui devient primordiale dans le contexte actuel de prise de conscience de notre impact environnemental, de la raréfaction de l'énergie et des matières premières.

Nous vous souhaitons une agréable découverte de l'univers des matériaux et une bonne lecture des pages qui suivent.

Michel DUPEUX et Joël COURBON

AVERTISSEMENT

Les données figurant dans les tableaux et diagrammes de cet ouvrage n'ont qu'une valeur indicative et ne doivent en aucun cas être utilisées pour des calculs de dimensionnement précis.

Les propriétés des matériaux dépendant étroitement de leurs conditions d'élaboration, de transformation et d'utilisation, pour un calcul précis on devra exclusivement se baser sur les caractéristiques et spécifications fournies et garanties par l'élaborateur du matériau utilisé, ou obtenues à l'aide d'essais spécifiques de l'utilisation envisagée.

Table des matières

AVANT-PROPOS	V
--------------	---

CHAPITRE 1 • GÉNÉRALITÉS : QU'EST-CE QU'UN MATÉRIAU ?	1
---	---

1.1 Définition	1
----------------	---

1.2 Propriétés	2
----------------	---

PARTIE 1 : COMPOSITION ET STRUCTURE

CHAPITRE 2 • COMPOSITION CHIMIQUE DES MATÉRIAUX	9
---	---

2.1 Classification des éléments chimiques	9
---	---

2.2 Liaisons chimiques	14
------------------------	----

2.3 Classification des matériaux et des propriétés	15
---	----

CHAPITRE 3 • STRUCTURE DES MATÉRIAUX SOLIDES	19
--	----

3.1 Solides amorphes	19
----------------------	----

3.2 Solides cristallins	23
-------------------------	----

3.3 Effets de la composition chimique	32
3.4 Défauts cristallins	34
3.5 Effets de la température	40
3.6 Principales techniques de caractérisation chimique et structurale	47
CHAPITRE 4 • ÉQUILIBRE THERMODYNAMIQUE	61
4.1 Changements de structure dans un matériau	61
4.2 Diagrammes d'équilibre de phases	64
CHAPITRE 5 • CINÉTIQUE DES TRANSFORMATIONS DE PHASES	79
5.1 Thermodynamique des transformations de phases	79
5.2 Transformations diffusives	81
5.3 Transformations displacives	88
5.4 Applications : notions de base des traitements thermiques	90

PARTIE 2 : PROPRIÉTÉS

CHAPITRE 6 • PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES	95
6.1 Déformation élastique des solides	95
6.2 Déformation plastique des solides	98
6.3 Comportement mécanique quasi-statique	108
6.4 Ténacité et rupture	126
6.5 Comportement mécanique dynamique	131
6.6 Fractographie	134

CHAPITRE 7 • PROPRIÉTÉS PHYSIQUES 139

7.1 Masses volumiques 139

7.2 Propriétés électriques 141

7.3 Propriétés magnétiques 147

7.4 Propriétés optiques 151

7.5 Propriétés thermiques 155

CHAPITRE 8 • DÉGRADATION : VIEILLISSEMENT, CORROSION, USURE 161

8.1 Vieillissement 161

8.2 Corrosion 165

8.3 Frottement et usure 177

**CHAPITRE 9 • IMPACT ENVIRONNEMENTAL,
IMPACT SANITAIRE, RECYCLABILITÉ 181**

9.1 Coût en énergie 181

9.2 Risques sanitaires, toxicité 183

9.3 Recyclage 193

PARTIE 3 : PRINCIPAUX MATÉRIAUX USUELS**CHAPITRE 10 • MÉTAUX ET ALLIAGES 201**

10.1 Généralités 201

10.2 Désignation normalisée des métaux et alliages 203

10.3 Fer et alliages ferreux 223

10.4 Aluminium et alliages d'aluminium	243
10.5 Cuivre et alliages cuivreux	249
10.6 Zinc et alliages de zinc	254
10.7 Magnésium et alliages de magnésium	255
10.8 Titane et alliages de titane	257
10.9 Nickel et alliages de nickel	258
10.10 Métaux rares et métaux critiques	259
10.11 Méthodes de mise en œuvre des métaux et alliages	261
10.12 Guide d'identification des métaux et alliages	262
CHAPITRE 11 • MATÉRIAUX ORGANIQUES	267
11.1 Généralités	267
11.2 Principaux polymères thermoplastiques	278
11.3 Principaux polymères thermodurcissables	281
11.4 Principaux élastomères	281
11.5 Biopolymères	285
11.6 Méthodes de mise en œuvre des matériaux organiques	289
11.7 Guide d'identification des polymères	290
CHAPITRE 12 • MATÉRIAUX MINÉRAUX	297
12.1 Généralités	297
12.2 Méthodes d'élaboration et de mise en œuvre des matériaux minéraux	301
12.3 Verres minéraux	304
12.4 Céramiques traditionnelles	307

12.5 Céramiques techniques et cermets	309
12.6 Autres matériaux minéraux	311
CHAPITRE 13 • MATÉRIAUX COMPOSITES, MULTIMATÉRIAUX, REVÊTEMENTS ET TRAITEMENTS DE SURFACE, NANOMATÉRIAUX	315
13.1 Généralités	315
13.2 Matériaux composites	316
13.3 Multimatériaux	335
13.4 Traitements de surface et revêtements	336
13.5 Matériaux cellulaires et poreux	343
13.6 Nanomatériaux	345
CHAPITRE 14 • SÉLECTION DES MATÉRIAUX	351
14.1 Propriétés d'usage – analyse du cycle de vie	352
14.2 Adéquation matériau-fonction	354
14.3 Adéquation matériau-procédé	357
14.4 Fabrication additive	364
14.5 Sélection multicritères	371
ANNEXES	375
BIBLIOGRAPHIE	379
INDEX GÉNÉRAL FRANÇAIS-ANGLAIS	385
INDEX DES MATÉRIAUX	399

Chapitre 1

Généralités : qu'est-ce qu'un matériau ?

Les objets qui nous entourent, que nous manipulons quotidiennement, sont tous constitués d'une matière choisie pour sa bonne adaptation à la fonction de l'objet en question et au procédé utilisé pour conférer à l'objet la forme souhaitée. La notion de **matériau** est donc rigoureusement indissociable de l'intérêt que peut présenter la substance en question pour l'obtention d'un objet fini (figure 1.1).

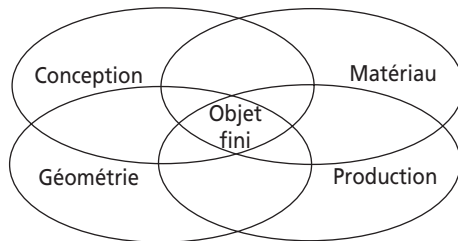


Figure 1.1 Interactions présidant à la réalisation d'un objet fini.

1.1 DÉFINITION

De manière symbolique et résumée, un **matériau** est une **matière** dont on fait un **matériel**.

De manière plus précise et plus complète :

Un matériau est la forme marchande d'une matière première choisie en raison de propriétés d'usage spécifiques et mise en œuvre par des techniques appropriées pour l'obtention d'un objet de géométrie donnée à fonction préméditée.

Tous les matériaux ont donc un rôle direct à jouer dans une fonction ou une combinaison de fonctions de l'objet qu'ils constituent. Une terminologie courante consiste à distinguer, parmi les dizaines de milliers de matériaux utilisés dans les applications de toutes sortes, les **matériaux de structure**, dont la fonction essentielle consiste à supporter des sollicitations mécaniques, et les **matériaux fonctionnels** dont le rôle principal est d'un autre registre physico-chimique : optique, électrique, magnétique, thermique, etc. Cette distinction étant quelque peu simpliste bien que fréquente, c'est sur d'autres bases plus précises que sera fondée la classification des matériaux présentée au paragraphe 2.3.

1.2 PROPRIÉTÉS

Les propriétés d'usage des matériaux ont essentiellement deux origines :

- leur **composition chimique** (*nature* des atomes ou molécules qui les constituent) ;
- leur **microstructure** (*organisation* des atomes constitutifs).

La caractéristique la plus évidente de la matière non vivante qui nous entoure est son **état physique** : solide, liquide ou gazeux. Ces différents états physiques proviennent essentiellement des effets de la **température** sur la microstructure, perceptibles à travers les variations de la **viscosité** de la matière, c'est-à-dire sa résistance à l'écoulement (figure 1.2).

La **température** de la matière mesure essentiellement le degré d'agitation et de désordre (ou **entropie**) des atomes qui la constituent. Lorsqu'elle s'élève, les atomes vibrent autour de leur position moyenne à la fréquence de Debye ν_D (cf. Annexe), occupant ainsi un espace plus important (d'où la dilatation thermique) et se déplaçant plus facilement (d'où la diffusion et la mobilité atomique). Ce n'est qu'au zéro absolu de l'échelle Kelvin qu'ils seraient rigoureusement immobiles.

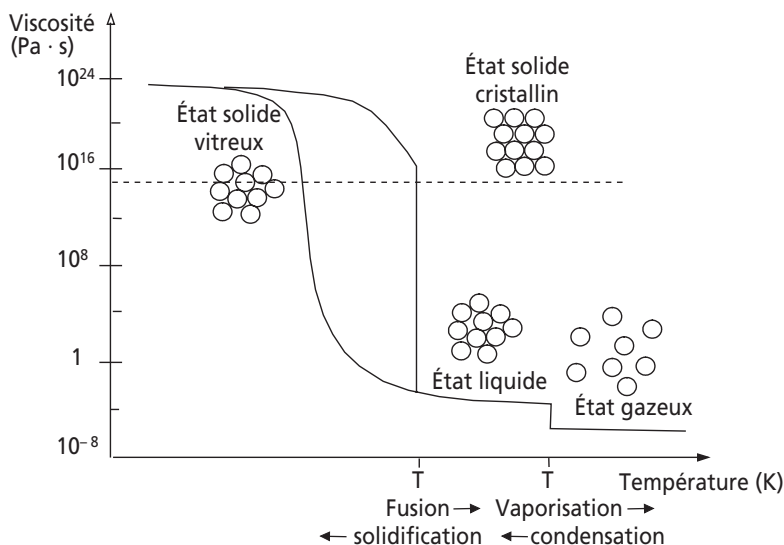


Figure 1.2 Changements d'état de la matière en fonction de la température.

- À température élevée, la matière est à l'**état gazeux**, état caractérisé par une **distance importante** entre atomes ou molécules disposés alors en **désordre**. Un gaz est donc compressible et très fluide. Sa viscosité est de l'ordre de 10^{-5} poiseuilles (Pl) ou $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (cf. Annexe « Constantes physiques et unités de mesure »).
- À température plus basse, les forces d'attraction interatomiques ou intermoléculaires deviennent non négligeables devant l'agitation thermique et peuvent provoquer le passage à l'**état liquide**. Les atomes ou molécules sont alors en **désordre**, mais à **courte distance**. Un liquide est donc fluide et peu compressible. Sa viscosité est de l'ordre de 10^{-4} à 10^{-3} Pl.
- À température encore plus basse, les forces d'attraction interatomiques devenant encore plus prépondérantes, la matière peut passer à l'**état solide cristallisé**, augmentant ainsi en général sa compacité. Les atomes sont alors **ordonnés** et à **courte distance**.

Un solide cristallin est donc très peu fluide et très peu compressible. Sa viscosité est de l'ordre de 10^{17} Pl.

- Si l'abaissement de température s'effectue rapidement par rapport à la mobilité atomique, les atomes n'ont pas la possibilité de s'ordonner avant que l'arrêt de la diffusion ne les immobilise. Le liquide se fige alors en **solide amorphe ou vitreux**, les atomes y sont en **désordre à courte distance**. La viscosité d'un solide vitreux varie continûment avec la température depuis celle d'un liquide jusqu'à celle d'un solide, la limite liquide/solide s'établissant à une viscosité d'environ 10^{15} Pl.

La **pression** joue également un rôle dans les changements d'état de la matière (figure 1.3) : une augmentation de pression tend à élever les températures de changement d'état, car son action stabilise les états condensés (solide, liquide), par rapport à l'état dispersé (gazeux). Cet effet est perceptible sur la plupart des matériaux (à l'exception notable de la glace, forme solide de l'eau).

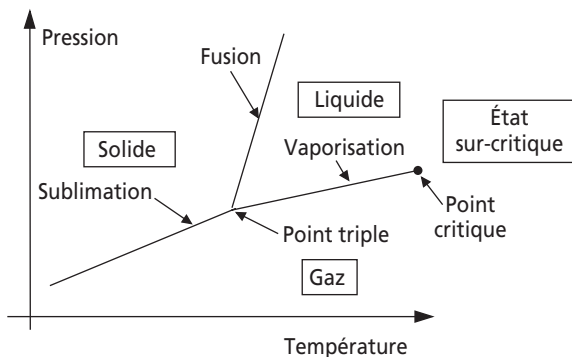


Figure 1.3 Variation des états physiques en fonction de la pression et de la température.

Les matériaux étant destinés à la réalisation d'objets capables de résister aux manipulations et au moins aux sollicitations de leur propre poids, la suite de cet ouvrage est essentiellement consacrée aux matériaux solides, amorphes ou cristallins. Nous étudierons notamment comment ces matériaux se comportent lorsque les pièces qu'ils constituent sont sollicitées en service (figure 1.4).

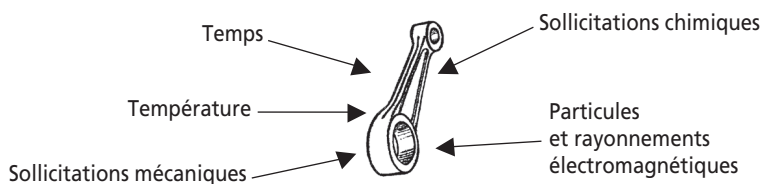


Figure 1.4 Types de sollicitations subies par un matériau en service.

PARTIE 1

COMPOSITION ET STRUCTURE

