

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

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du

droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



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

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com

ISBN 978-2-10-085194-2

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

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 Vieillessement	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).

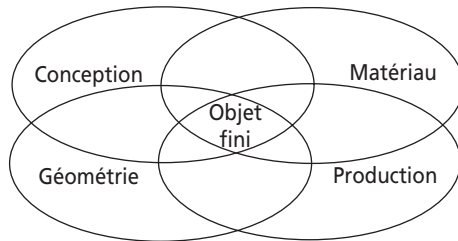


Figure 1.1 Interactions présidant à la réalisation d'un objet fini.

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.

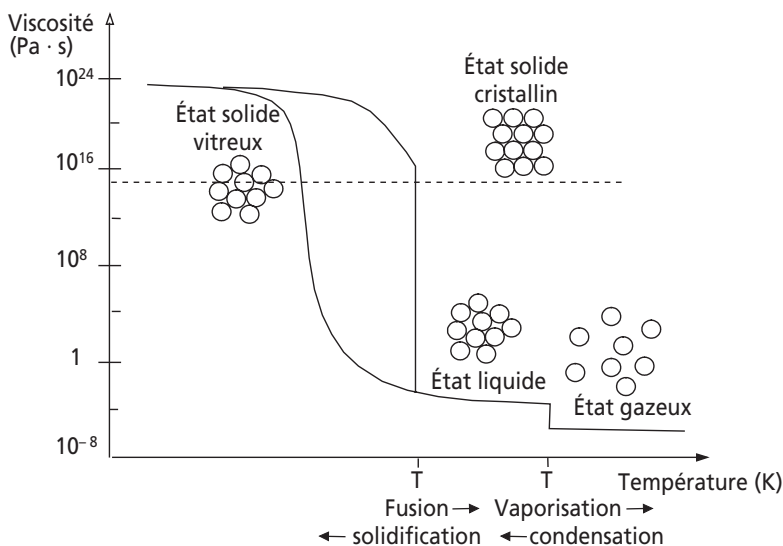


Figure 1.2 Changements d'état de la matière en fonction de la température.

- 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 Pa · 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).

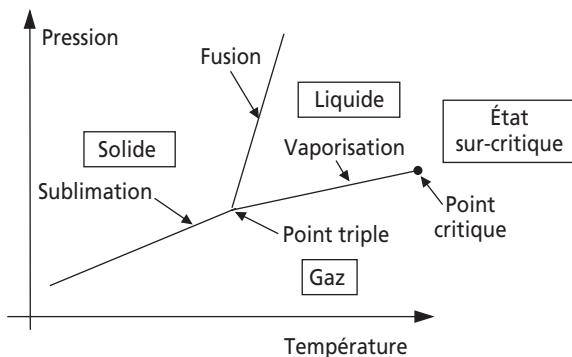


Figure 1.3 Variation des états physiques en fonction de la pression et de la température.

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).

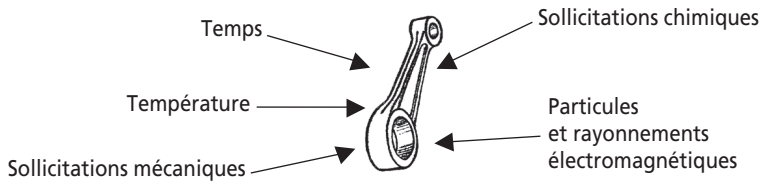


Figure 1.4 Types de sollicitations subies par un matériau en service.

PARTIE 1

**COMPOSITION
ET STRUCTURE**

Chapitre 2

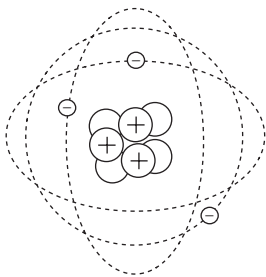
Composition chimique des matériaux

2.1 CLASSIFICATION DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES

Les atomes des éléments chimiques diffèrent par leur structure à l'échelle subatomique, c'est-à-dire le nombre et la nature des particules élémentaires qui les constituent :

- noyau : protons et éventuellement neutrons ;
- cortège électronique gravitant autour du noyau : électrons en nombre égal aux protons dans un atome à l'équilibre.

Les protons sont chargés positivement et les électrons négativement, de charges élémentaires égales en valeurs absolues, de sorte que l'atome



- 3 électrons
- 3 protons
- ⇒ **numéro atomique (nombre de protons) $Z = 3$**
- Noyau :
- 3 protons
- 4 neutrons
- ⇒ **masse atomique (nombre de protons et de neutrons) $A = 7$**

Figure 2.1 Exemple de l'atome de lithium.

est électriquement neutre à l'état d'équilibre (figure 2.1). La masse de l'électron est négligeable devant celle du proton ou du neutron (tableau 2.1).

Les orbitales des électrons occupent dans un atome des couches successives, correspondant à des niveaux d'énergie discrets, qui deviennent des **bandes** dans les solides regroupant plusieurs atomes. Ces niveaux ne peuvent contenir qu'un nombre limité d'électrons : deux pour le premier, huit pour les niveaux suivants (du moins lorsqu'ils se trouvent en position externe), et ils sont séparés par des **bandes interdites**. On appelle **énergie de Fermi** de l'atome considéré la limite supérieure du remplissage des états d'énergie électroniques à l'équilibre thermodynamique et au zéro absolu.

Tableau 2.1 MASSES ET CHARGES ÉLECTRIQUES DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES.





















Particule	Masse (au repos)	Charge électrique
Électron	$9,110 \cdot 10^{-31}$ kg	$-1,602 \cdot 10^{-19}$ C
Proton	$1,673 \cdot 10^{-27}$ kg	$+1,602 \cdot 10^{-19}$ C
Neutron	$1,675 \cdot 10^{-27}$ kg	0

Tableau de classification périodique des éléments chimiques ou **tableau de Mendéléïev** (tableaux 2.2 et 2.3). Les lignes ou périodes sont les niveaux successifs des couches électroniques. Les colonnes ou groupes sont le nombre d'électrons dans la couche externe.

À partir du deuxième élément de la quatrième période (calcium), les couches électroniques internes peuvent recevoir plus de huit électrons ; des éléments supplémentaires s'intercalent donc avant le passage au groupe suivant.

Les propriétés chimiques d'un élément proviennent essentiellement de ses électrons, et en particulier de ceux de la couche externe, appelés **électrons de valence** ; ces propriétés sont donc liées au groupe (colonne du tableau de classification périodique) auquel il appartient.

Tableau 2.2 PRINCIPE DE LA CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES.

	Groupe I	Groupe II	Groupe III	Groupe IV	Groupe V	Groupe VI	Groupe VII	Groupe VIII
1 ^{re} Période (bande K)	Z = 1 A = 1  Hydrogène H							Z = 2 A = 4  Hélium He
2 ^e Période (bandes K et L)	Z = 3 A = 7  Lithium Li	Z = 4 A = 9  Béryllium Be	Z = 5 A = 11  Bore B	Z = 6 A = 12  Carbone C	Z = 7 A = 14  Azote N	Z = 8 A = 16  Oxygène O	Z = 9 A = 19  Fluor F	Z = 10 A = 20  Néon Ne
3 ^e Période (bandes K, L et M)	Z = 11 A = 23  Sodium Na	Z = 12 A = 24  Magnésium Mg	Z = 13 A = 27  Aluminium Al	Z = 14 A = 28  Silicium Si	Z = 15 A = 31  Phosphore P	Z = 16 A = 32  Soufre S	Z = 17 A = 35  Chlore Cl	Z = 18 A = 40  Argon Ar
4 ^e Période (bandes K, L, M et N)	Z = 19 A = 39  Potassium K	Z = 20 A = 40  Calcium Ca	...					
5 ^e Période...	⋮							

Isotopes. Éléments possédant le même numéro atomique (donc les mêmes propriétés électroniques et chimiques), mais des masses atomiques différentes, en raison d'un nombre différent de neutrons. Dans la nature, certains éléments chimiques existent sous forme de mélanges d'isotopes ; ceci entraîne des valeurs de masses atomiques moyennes non entières (tableau 2.3).

Propriétés des groupes. Les éléments du groupe VIII, appelés **gaz rares**, sont caractérisés par une couche externe complète ; ceci leur confère une stabilité chimique exceptionnelle.

Les éléments du groupe I A (tableau 2.3) ne possèdent qu'un seul électron sur leurs couches externes : ils ont tendance à s'en défaire pour avoir une couche extérieure saturée et donner des ions positifs ou **cations**. Cette tendance s'étend aussi à tous les éléments de la partie gauche du tableau, appelés **métaux**, qui sont tous donneurs d'électrons. Les éléments du groupe VII A possèdent sept électrons sur leurs couches externes : ils ont tendance à la compléter en captant un électron disponible dans leur voisinage pour donner des ions négatifs ou **anions**. Cette tendance s'étend aussi à certains éléments de la partie droite du tableau, appelés **non-métaux**, tous accepteurs d'électrons. Certains éléments situés à la limite entre ces deux zones présentent des caractères mixtes, variables selon le champ électrique auquel ils sont soumis (ils sont semi-conducteurs). La figure 2.2 illustre ces différences de comportement par les structures de bandes de ces divers types d'atomes.

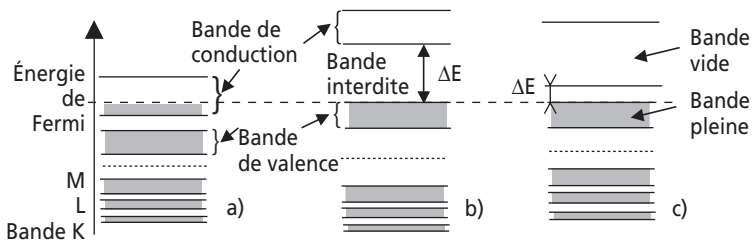
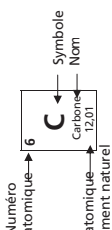


Figure 2.2 Schémas des structures de bandes.

a) d'un amas d'atomes de métal (la bande de conduction comporte des états disponibles); b) d'un amas d'atomes de non-métal (la bande interdite a une largeur ΔE importante); c) d'un amas d'atomes de semi-conducteur (la bande interdite a une largeur faible).

Tableau 2.3 CLASSIFICATION PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS (TABLEAU DE MENDELÉÏEV).
 LES ÉLÉMENTS EN ITALIQUES N'EXISTENT PAS À L'ÉTAT NATUREL. LEUR MASSE ATOMIQUE EST INCERTAINE EN RAISON
 DE L'EXISTENCE DE PLUSIEURS ISOTOPES EN PROPORTION NON DÉFINIES.

Groupe	VIII A (ou 0)																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
I A	H Hydrogène 1,008	He Hélium 4,003																
II A	Li Lithium 6,94	Be Béryllium 9,01																
III A	Na Sodium 22,99	Mg Magnésium 24,31																
IV A	K Potassium 39,10	Ca Calcium 40,08	Sc Scandium 44,96	Ti Titane 47,90	V Vanadium 50,94	Cr Chrome 52,00	Mn Manganèse 54,94	Fe Fer 55,85	Co Cobalt 58,93	Ni Nickel 58,71	Cu Cuivre 63,54	Zn Zinc 65,37	Ga Gallium 69,72	Ge Germanium 72,59	As Arsenic 74,92	Se Sélénium 76,96	Br Brome 79,91	Kr Krypton 83,80
V A	Rb Rubidium 85,47	Sr Strontium 87,62	Y Yttrium 88,91	Zr Zirconium 91,22	Nb Niobium 92,91	Mo Molybdène 95,94	Tc Technétium 98	Ru Ruthénium 101,07	Rh Rhodium 102,9	Pd Palladium 106,4	Ag Argent 107,9	Cd Cadmium 112,4	In Indium 114,82	Sn Étain 118,69	Sb Antimoine 121,75	Te Tellure 127,6	I Iode 126,9	Xe Xénon 131,3
VI A	Cs Césium 132,9	Ba Baryum 137,34	La Lanthane 138,9	Hf Hafnium 178,5	Ta Tungstène 180,95	W Tungstène 186,2	Re Rhenium 186,2	Os Osmium 190,2	Ir Iridium 192,2	Pt Platine 195,1	Au Or 196,97	Hg Mercure 200,6	Tl Thallium 204,4	Pb Plomb 207,2	Bi Bismuth 209,0	Po Polonium 210	At Astate 210	Rn Radon 222
VII A	Fr Francium 223	Ra Radium 226	Ac Actinium 227	Rf Rutherfordium 261	Db Dubnium 268	Sg Seaborgium 271	Bh Bohrium 272	Hs Hassium 277	Mt Meitnerium 276	Ds Darmstadtium 281	Rg Roentgenium 280	Cn Copernicium 285	Nh Nihonium 286	Fl Flerovium 289	Mc Moscovium 288	Lv Livermorium 293	Ts Tennessine 294	Og Oganesson 294
VIII A	La Lanthane 138,9	Ce Cérum 140,1	Pr Praseodyme 140,9	Nd Néodyme 144,2	Pm Prométhée 145	Sm Samarium 150,35	Eu Europium 151,9	Gd Gadolinium 157,2	Tb Terbium 158,9	Dy Dysprosium 162,5	Ho Holmium 164,9	Er Erbium 167,3	Tm Thulium 168,9	Yb Ytterbium 173,0	Lu Lutécium 174,9	No Nobelium 259	Lr Lawrencium 262	
VIII B	89 à 103 Lanthanides ou terres rares	89 à 103 Actinides	57 à 71 Lanthanides ou terres rares	57 à 71 Actinides	57 à 71 Lanthanides ou terres rares	57 à 71 Actinides	57 à 71 Lanthanides ou terres rares	57 à 71 Actinides	57 à 71 Lanthanides ou terres rares	57 à 71 Actinides	57 à 71 Lanthanides ou terres rares	57 à 71 Actinides	57 à 71 Lanthanides ou terres rares	57 à 71 Actinides	57 à 71 Lanthanides ou terres rares	57 à 71 Actinides	57 à 71 Lanthanides ou terres rares	57 à 71 Actinides

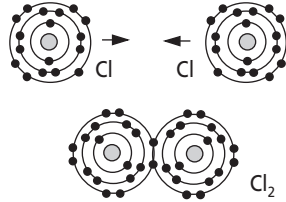


2.2 LIAISONS CHIMIQUES

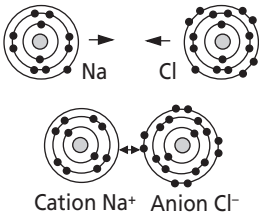
2.2.1 Liaisons fortes

Liaison covalente. Elle est assurée par la mise en commun de deux électrons pour compléter la couche externe de chaque atome.

Elle apparaît entre deux atomes de non-métaux (liaison assurée par des électrons de la bande de valence).



Exemple. La molécule de dichlore Cl_2 .



Liaison ionique. Elle est assurée par le transfert d'un électron d'un atome à l'autre.

Elle apparaît entre un atome d'un métal et un atome d'un non-métal.

Après leur liaison, les deux atomes deviennent des ions chargés électriquement.

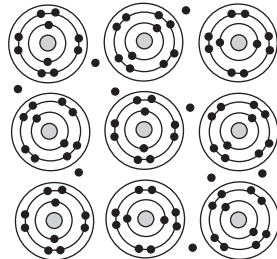
Exemple. Le chlorure de sodium NaCl .

Liaison métallique. Elle est assurée par la mise en commun d'électrons de la couche périphérique; le « gaz » constitué par ces électrons libres et délocalisés assure la cohésion de l'ensemble des cations restants.

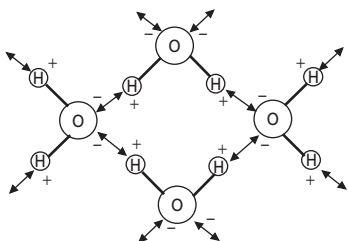
Elle apparaît entre les éléments d'un amas d'atomes métalliques (liaison assurée par les électrons de la bande de conduction).

Les électrons de la liaison métallique sont mobiles et disponibles pour assurer la circulation éventuelle d'un courant électrique.

Exemple. Cristal de sodium Na.



2.2.2 Liaisons faibles ou liaisons secondaires



Ce sont de simples attractions électrostatiques entre charges électriques de signes opposés.

Elles apparaissent entre les pôles + et - de molécules à répartitions de charges inhomogènes ou polarisables.

Elles agissent à plus longue distance, mais avec une intensité plus faible que les liaisons fortes.

Exemples.

- Liaisons de Van der Waals entre macromolécules dans un polymère.
- Liaisons-hydrogène entre molécules d'eau H_2O dans la glace (cf. schéma ci-dessus).

2.3 CLASSIFICATION DES MATÉRIAUX ET DES PROPRIÉTÉS

2.3.1 Les grandes classes de matériaux

De nombreuses propriétés physico-chimiques et propriétés d'usage des matériaux sont étroitement liées à la nature des liaisons chimiques entre les atomes qui les constituent. C'est sur cette base qu'est établie la distinction entre les principales classes de matériaux.

Matériaux métalliques. Ce sont les métaux purs et leurs mélanges, ou alliages, comportant essentiellement des **liaisons métalliques**.

Matériaux organiques. Ce sont les matériaux d'origine biologique, les polymères et élastomères de synthèse, comportant des liaisons covalentes et des liaisons faibles.

Matériaux minéraux. Ce sont les roches, oxydes, verres minéraux, céramiques comportant des liaisons ioniques et/ou des liaisons covalentes.

Matériaux composites. Ils associent de manière structurée à fine échelle des matériaux différents, appartenant éventuellement à des classes différentes parmi les trois précédentes.

2.3.2 Les propriétés d'usage

Les propriétés physico-chimiques et les propriétés d'usage des matériaux sont multiples et peuvent faire l'objet de diverses classifications (tableau 2.4). Certaines sont principalement conditionnées par la nature des atomes et des liaisons chimiques présentes majoritairement dans le matériau : masse volumique, stabilité mécanique et thermique, température de fusion, souplesse ou rigidité élastique, fragilité ou ductilité, conductivité électrique et thermique, propriétés magnétiques... Certaines sont sensibles à la structure suivant laquelle les atomes sont disposés et organisés (cf. chapitre 3) : rigidité plastique, dureté, ductilité, ténacité...

Ces propriétés seront définies et caractérisées de manière plus détaillée dans la partie 2 du présent ouvrage.

2.3.3 Les principales propriétés des grandes classes de matériaux

Matériaux métalliques

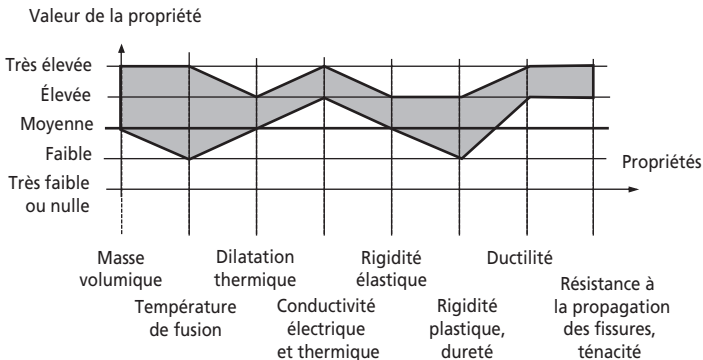
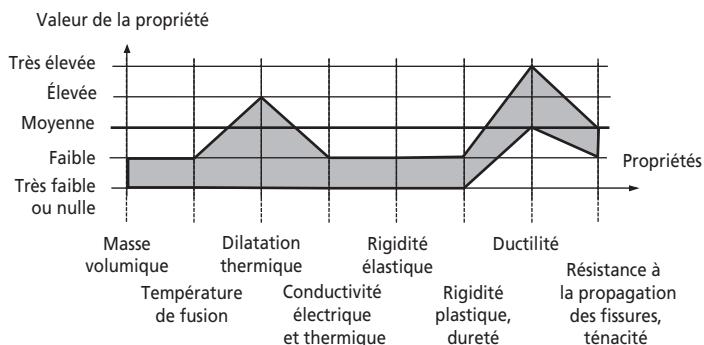


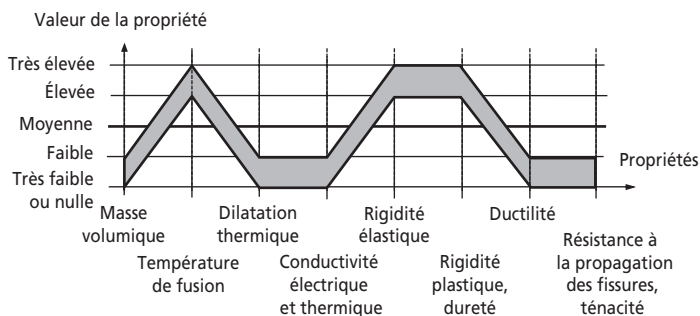
Tableau 2.4 CLASSIFICATION NON EXHAUSTIVE DES PROPRIÉTÉS D'USAGE DES MATÉRIAUX : OUTRE LEUR CARACTÈRE OBJECTIF OU ATTRIBUÉ, CES PROPRIÉTÉS PEUVENT ÊTRE DE VOLUME (V) OU DE SURFACE (S), PROPRES AU MATÉRIAU SEUL (P) OU INTERACTIVES (I) ENTRE LE MATÉRIAU ET SON ENVIRONNEMENT.

Propriétés objectives (intrinsèques au matériau)		Propriétés attribuées (dépendant du contexte)	
V, P	Mécaniques statiques : – constantes d'élasticité, – dureté, – contraintes limites...	V, P	Disponibilité : – ressources, – réserves, – fournisseurs, – niveaux de qualité...
V, P ou I	Mécaniques dynamiques : – viscosité, – fluage, fatigue, – ténacité, – amortissement...	V, P ou I	Coût : – matière première, – élaboration, – mise en œuvre...
V, P	Structurales : – structure amorphe ou cristalline, variétés allotropiques, – températures de changement d'état, – homogénéité...	S et V, P ou I	Degré de familiarité : – connaissance du matériau, expérience à court et long terme, – savoir-faire acquis sur le matériau...
V, P	Physiques : – masse volumique, – propriétés électriques, thermiques, magnétiques, optiques, radioactives...	V, P	Aptitudes à la mise en œuvre : – ductilité, – coulabilité, – usinabilité...
S, I	Chimiques : – réactivité, – toxicité, – tenue à la corrosion...	S, I	Aptitudes à l'assemblage : – soudabilité, – collabilité...
V, I	Tenue au vieillissement. Stabilité physique.	V, P	Désignation : – chimique, – normalisée, – commerciale...
S, I	Tribologiques : – friction, – usure...	S et V, P ou I	Impact environnemental : – contenu en énergie, – dégradabilité, – recyclabilité...
	...	S, P	Caractéristiques organoleptiques : – aspect, texture, couleur, – toucher, odeur, goût...

Matériaux organiques



Matériaux minéraux



Matériaux composites. Selon leur structure et la nature de leurs composants, les propriétés des matériaux composites sont extrêmement variables : pour la plupart, elles sont intermédiaires entre les propriétés des matériaux qui les constituent. Parfois cependant, certaines **propriétés émergentes** (propriétés résultant de l'ensemble de la structure et des constituants du matériau, cf. § 13.2.3) peuvent prendre des valeurs inattendues.