

Précis des matériaux

Michel Dequatremare
Thierry Devers

DUNOD

Tout le catalogue sur
www.dunod.com



© N Maverick – Fotolia.com

Une autre version de cet ouvrage existe dans la collection Parcours IUT
aux éditions Dunod.

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 s'est généralisée dans les établissements

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, Paris, 2012
ISBN 978-2-10-058221-1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o 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.

Table des matières

Avant-Propos	1
1 Historique des matériaux	2
2 Définition et classes des matériaux	4
3 Les liaisons	6
4 Les matériaux organiques	11
5 Les matériaux composites	17
6 Les matériaux minéraux	23
7 Les nanomatériaux	28
8 Structures et cristallographie	31
9 Les défauts dans les solides	36
10 Diffusion dans les solides	41
11 Essai de traction	45
12 La Résilience – Dureté	49
13 La Fatigue – Le Fluage	56
14 La corrosion	64
15 Préparation métallographique	70
16 Moyens de caractérisation et d'observation	74
17 Alliages et diagrammes d'équilibres	81
18 Désignation normalisée des aciers	89
19 Diagramme Fer-Carbone	95
20 Les aciers	98
21 Microstructure des aciers à l'équilibre	108
22 Les Fontes	112
23 Désignation des autres alliages métalliques courants	118
24 Les alliages d'aluminium	123
25 Les alliages de titane	130

26	Les alliages de cuivre	134
27	Les alliages de zinc – alliages de magnésium	141
28	Les alliages réfractaires	144
29	Trempe des aciers	147
30	Durcissement structural	155
31	Revenus – Recuits	160
32	Traitements thermochimiques de surface	162
33	Les traitements de surface	166
34	Défectologie et contrôle des matériaux	171
35	Inspection visuelle (VT) – Ressuage (PT)	179
36	Magnétoscopie (MT)	183
37	Radiographie X et Gammagraphie (RT)	188
38	Ultrasons (US)	192
39	Courants de Foucault (ET)	198
40	Émission acoustique	203
41	Sélection des matériaux	206
	Glossaire	210
	Bibliothèque des matériaux	219

Avant-Propos

Il fut un temps où le terme « matériaux », prononcé devant un quelconque interlocuteur français, évoquait immédiatement et exclusivement « béton, parpaings, plâtre, bois et autres tuiles et briques ». Ce temps-là, pas si lointain, est heureusement en passe d'être révolu car nombreux sont ceux qui sont désormais conscients qu'au même titre que les matériaux du bâtiment et du génie civil, existent d'autres matériaux : en fait, tous ceux qui permettent de donner corps à chacun des objets qui nous entourent dans notre vie quotidienne.

L'architecte, l'ingénieur, le concepteur, devant sa planche à dessin autrefois, son écran d'ordinateur aujourd'hui, ne manipule que du virtuel. Il semble que ce soit l'une des caractéristiques de l'intelligence humaine que d'être capable d'imaginer une création – désormais avec l'aide de quelques outils graphiques – avant de la réaliser. Et dès ce stade, le concepteur doit impérativement faire l'hypothèse d'une matière constitutive disponible dont les caractéristiques soient compatibles, voire optimales, en vue de la fabrication puis de l'utilisation de l'objet en question : voilà la définition même d'un matériau, au sens le plus général. À l'époque paléolithique, les concepteurs pensaient certainement en termes de bois, de silex, de tendon ou d'os ; à l'heure actuelle, les bureaux d'études ont potentiellement à leur disposition des dizaines de milliers de matériaux (même si leurs standards d'entreprise en limitent généralement le nombre de manière beaucoup plus restreinte) : métaux et alliages, polymères et élastomères, céramiques et verres, papiers et cartons, composites sont tous couramment utilisés dans tous les domaines depuis la vie courante jusqu'aux technologies de pointe.

Il va de soi que cette évolution explosive du nombre de matériaux disponibles doit s'accompagner d'une information et d'une formation des concepteurs, fabricants et utilisateurs potentiels si on espère qu'ils soient capables d'en tirer le meilleur parti. C'est là l'origine de l'apparition dans les formations universitaires et professionnelles des enseignements de « Science et Génie des Matériaux » là où on ne parlait jadis – et dans des filières distinctes – que de métallurgie, de plasturgie ou de physico-chimie des céramiques. Avec, il faut bien le reconnaître, quelques décennies de retard par rapport à la littérature anglo-saxonne, des manuels francophones sont enfin apparus dans les bibliothèques universitaires dans les années 1980-90 pour apporter la vision d'ensemble propre à la Science des Matériaux. Peu à peu, avec le jeu du remplacement des générations, cette approche plus synthétique gagne les milieux industriels et professionnels, venant fort pertinemment enrichir et élargir le point de vue des spécialistes qui travaillent une classe plus restreinte de matériaux, sans rien enlever à leurs compétences précieuses.

Il reste donc du travail à faire et de la place pour les créateurs d'outils de travail francophones de toutes sortes en Science et Génie des Matériaux. Le choix qu'ont fait dans ce domaine nos collègues Thierry DEVERS et Michel DEQUATREMARE est tout à fait opportun et méritoire, puisque leur ouvrage ne semble pas avoir d'équivalent pour l'heure ; il vise un public qui appréciera d'y trouver l'essentiel des connaissances de base sous une forme épurée, attractive et facilement accessible. Nous ne pouvons que souhaiter qu'il ait une longue vie et rencontre tout le succès qu'il mérite.

Michel DUPEUX

Ancien Professeur à l'Université Joseph Fourier de Grenoble

1

Historique des matériaux

Si on définit qu'un matériau est de la matière ouvrée, travaillée par l'Homme, on s'aperçoit que les matériaux jouent un rôle prédominant dans l'évolution de la société ; en témoigne, la subdivision de l'histoire de l'humanité. Les historiens parlent de l'Âge de pierre (taillée, polie...), l'Âge du cuivre (le chalcolithique), d'Âge du bronze et de l'Âge du fer, dans lequel nous vivons encore. Demain sera-t-il nommé Âge du silicium ? Du silex (matière), l'Homme va façonner des pierres taillées (une face, deux faces...) un matériau qui lui servira à chasser, à travailler la terre mais aussi à tuer. On peut dire aussi qu'un des grands catalyseurs de la science des matériaux a été la maîtrise du feu. La découverte de nouveaux matériaux est liée à l'élévation de la température. Les premiers hommes ont utilisé les matières qu'ils trouvaient à l'état brut (bois, pierre, argile...) ou à l'état natif comme l'or dont on martèle des pépites. Si la domestication du feu date de 500 000 avant J.-C., on estime que c'est vers - 14000 ans que le feu est utilisé pour la cuisson des céramiques, puis vers - 4500 pour le travail du verre. Du point de vue des matériaux métalliques, l'Âge du cuivre (- 4500) correspond à la fin du Néolithique. La maîtrise du feu permet alors de dépasser les 600 degrés indispensables à la cuisson des poteries ordinaires pour atteindre les 1 150 degrés nécessaires à la réduction et à la fusion du cuivre. Cette évolution est utilisée pour la métallurgie de l'or, de l'argent, du plomb, de l'antimoine (*anti-monos* : qu'on ne trouve pas seul), et de l'étain. À partir de - 1800 (protohistoire), on mélange cet étain au cuivre pour donner naissance au bronze et, à l'Âge de bronze. Cet alliage plus dur que le cuivre (durcissement par effet de solution solide) est surtout utilisé pour les armes et des outils. Le développement de la production de bronze dans des régions dépourvues de minerai de cuivre ou d'étain marque un tournant capital dans la société et l'économie.

L'Âge du fer commence vers - 1100 dans le monde méditerranéen, et entre - 800 et - 700 dans le nord de l'Europe (civilisation celtique). Le fer est plus dur, possède une densité inférieure à celle bronze, il le supplante donc rapidement. Mais le travail du fer est plus complexe : il ne se trouve pas à l'état natif, hormis quelques traces d'origine météoritique, et fond à beaucoup plus haute température que le cuivre (1 535 °C contre 1 084 °C). Si à cette époque on dispose déjà de techniques de mise en forme telles que le tréfilage, l'estampage voir la soudure, ce n'est que vers -600 qu'apparaît en Chine l'acier (alliage de fer et de carbone), puis vers -200 en Europe. L'évolution de la métallurgie du fer franchit un pas important au xv^e siècle avec l'apparition des premiers «hauts fourneaux» et une découverte fortuite mais majeure d'un métal ferreux à l'état liquide : la fonte. Ce nouveau matériau est utilisé pour la fabrication de toutes sortes d'objets (boulets de canons, chenets). La fonte permet également de produire du fer en abondance, grâce à l'affinage : le lingot de fonte chauffé puis soumis à de l'air soufflé provoque la combustion du carbone contenu dans la fonte et un écoulement goutte à goutte de fer. Toutefois, il fallut attendre les grandes inventions du xix^e siècle (les fours Bessemer, Martin.) pour que l'acier, jusqu'alors fabriqué en faible quantité à partir du fer, connaisse un développement spectaculaire et s'impose rapidement comme le métal-roi de la révolution industrielle.

Entre 1904 et 1911, divers chercheurs mettent au point différents alliages que l'on pourrait aujourd'hui considérer comme inoxydables.

Au cours du xx^e siècle, des dizaines de milliers de nouveaux matériaux ont vu le jour ou ont subi des modifications de propriétés pour de nouvelles applications.

Parmi tous ces matériaux on peut citer :

Le silicium : c'est l'élément le plus abondant dans la croûte terrestre après l'oxygène. Il est utilisé depuis très longtemps comme composant essentiel du verre (SiO_2). Depuis le milieu xx^e siècle de nouveaux usages lui sont donnés, en électronique, les silicones ou la production des panneaux solaires photovoltaïques. Les galettes de silicium monocristallin (wafer) constituent le composant de base des microprocesseurs.

L'aluminium : l'alumine est découverte en 1821 au cours d'une étude sur la terre des Beaux de Provence (Bauxite). C'est en 1854 qu'est produit pour la première fois de l'aluminium par électrolyse. Depuis, ce métal occupe notre quotidien (canette, automobile, aéronautique). De part sa faible densité, son esthétique, sa bonne résistance à la corrosion et son faible coût de production, il est devenu le matériau le plus utilisé après le fer.

Le titane : le titane a été découvert entre 1789 et 1795, mais faut attendre 1939, pour le produire industriellement (procédé Kroll). De par ses propriétés physicochimiques (densité, propriétés mécaniques, résistance à la corrosion), le titane est très utilisé dans le domaine de l'aéronautique. Son module de Young proche de celui de l'os et sa biocompatibilité font de lui le matériau le plus utilisé pour les implants. Mais c'est sous sa forme de TiO_2 (pigment blanc) qu'il est le plus utilisé (80 % du marché).

Les verres techniques et les céramiques : les céramiques et les verres sont parmi les premiers matériaux produits par l'homme. Le verre est utilisé essentiellement en optique pour ses propriétés transparentes, en chimie et dans l'industrie agro-alimentaire. Il est utilisé comme fibre optique (1960), dans le stockage des déchets radioactifs et comme matériau de construction.

Les polymères et les composites : si le caoutchouc date de 1844, l'essor des polymères est lié au développement de la chimie organique. La découverte de la bakélite (1910), du nylon (1938) ouvrent la voie à de nombreux polymères (PVC, ABS, PC, Kevlar®). Un composite est constitué d'une matrice et de renforts (fibres de verre ou de carbone, poudres...). Si le bois est le premier matériau composite, la matrice des composites est souvent un polymère mais peut être métallique ou céramique. Les composites utilisés dans l'aéronautique, l'automobile, le spatial mais aussi dans le sport.

Les biomatériaux : les biomatériaux sont définis comme « *Tout matériau, naturel ou non, comprenant tout ou partie d'une structure vivante ou d'un appareil biomédical qui exécute ou remplace une fonction naturelle* ». Les thérapeutiques chirurgicales font appel aux biomatériaux ; prothèses dentaires ou de hanche (80 000/an en titane et céramiques), prothèses vasculaires, traitement des grands brûlés (substrat dermique acellulaire à base de collagène). Avec 1 200 000 unités/an, les lentilles de contact sont les biomatériaux les plus utilisés.

2

Définition et classes des matériaux

Mots-clés

Matériau, Métallique, Céramique, Organique, Minéraux.

1. DÉFINITION

Un matériau est une substance ou une matière d'origine naturelle ou artificielle utilisée par l'Homme pour la fabrication d'objets (Source : dictionnaire Larousse).

C'est donc une matière qui est sélectionnée ou transformée par l'Homme pour ses caractéristiques d'usage.

Un objet est le résultat de contraintes : de conception, de géométrie, de réalisation, de matériau, d'usage et de destruction (valorisation ou recyclage). Elles sont liées et les interactions sont nombreuses. La figure 2-1 montre ces interactions.

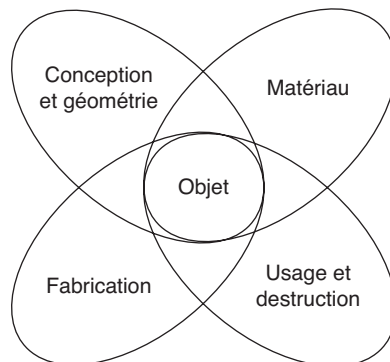


Figure 2-1 – Interactions aboutissant à un objet

Les propriétés recherchées du matériau peuvent être :

- mécaniques
- chimiques
- thermiques
- optiques
- électroniques
- économiques
- etc.

2. CLASSES DE MATÉRIAUX

Les propriétés d'usage, qu'elles soient mécaniques ou physico-chimiques, sont liées à la nature des liaisons chimiques entre les atomes constituant le matériau.

C'est à partir de cette distinction que les grandes familles de matériaux ont été établies.

Nous trouvons trois grandes classes, plus une qui est une association entre les précédentes. Ces classes sont :

- les matériaux métalliques,
- les matériaux organiques,
- les matériaux minéraux,
- les matériaux composites.

Le tableau 2-1 donne la nature des liaisons chimiques ainsi que les niveaux de performance pour les caractéristiques principales.

Caractéristiques	Matériaux			
	Métalliques	Organiques	Minéraux	Composites
Liaisons chimiques	Métalliques	Covalentes faibles	Covalentes Ioniques	Associations
Masse volumique	1 - 3	4 - 5	4 - 5	4 - 5
Résistance élastique	1 - 3	4 - 5	1 - 2	1 - 2
Ductilité - Ténacité	1 - 2	3 - 5	5	1 - 2
Température d'usage	1 - 3	4 - 5	1 - 2	3
Conduction thermique	1 - 2	4 - 5	4 - 5	4 - 5
Conduction électrique	1 - 2	5	4 - 5	
Facilité de mise en forme	1 - 2	1 - 2	3 - 5	3
Recyclabilité - Valorisation	1	2 - 5	2 - 5	4 - 5

Tableau 2-1 – 1 : Très élevé ; 2 : Élevé ; 3 : Moyenne ; 4 : Faible ; 5 : Très faible

3 Les liaisons

Mots-clés

Structure électronique, Liaison ionique, Liaison covalente, Liaison métallique.

1. INTRODUCTION

L'atome se compose d'un noyau et d'électrons. Le noyau représentant la partie « pesante » de l'atome. Le nombre de chaque élément est défini par :

Z protons : Charge positive $1,6 \cdot 10^{-19}$ C (appelée charge élémentaire)

Masse au repos : $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$ kg

N neutrons : de masse équivalente à celle du proton $m_n \approx m_p$

Z électrons : situés à la périphérie sur les couches électroniques :

Charge négative : $-1,6 \cdot 10^{-19}$ C

Masse au repos : $m_e = 0,9 \cdot 10^{-30}$ kg

Soit un élément de numéro atomique Z, il aura :

Z protons, N neutrons et Z électrons.

sa masse (M) sera donnée par $Z m_p + Z m_e + N m_n$, si $m = m_p + m_n$, $M = (Z + N)m$

$M = A \cdot m$, A est le nombre de masse de l'élément et représente le nombre total des protons et des neutrons.

On notera ainsi les éléments de la classification par : ${}^A_Z E$

En 1913, Bohr représente les atomes avec des couches électroniques notées K, L, M, N. Selon la valeur de Z, ces différentes couches (représentant en fait des zones de probabilités de présence maximum des électrons) seront ou pas remplies puisque chacune d'elles ne peut contenir qu'un nombre limité d'électrons. Le remplissage des couches se fait selon une progression à n termes à 2 de raison : $\sum_0^n = 2 n^2$ (tableau 3-1).

n	Couche	Nombre d'électrons
1	K	2
2	L	8
3	M	18
4	N	32

Tableau 3-1

Remarque

Le nombre d'électrons permettant de remplir complètement une couche électronique caractérise la **valence** de l'élément considéré.

2. LES ISOTOPES

Deux isotopes sont des éléments qui possèdent le même nombre de protons (donc même numéro atomique Z, même place dans la classification périodique) mais un nombre de

neutrons différents (donc nombre de masse A et masse atomique différents). Ainsi, le carbone possède un certain nombre d'isotopes naturels ou artificiels. Certains sont instables. Le carbone 14 ($^{14}_6\text{C}$) est utilisé pour la datation.

3. LES LIAISONS

Différents types de liaisons peuvent exister entre atomes dans un solide. Certaines propriétés des matériaux sont liées à leur structure atomique, c'est-à-dire au type de liaison. On classe les liaisons en deux types:

- les liaisons fortes (covalente, ionique, métallique)
- les liaisons faibles (Van Der Waals, hydrogène)

a) La liaison covalente

La liaison covalente est caractérisée par la mise en commun, entre deux atomes, d'un ou plusieurs électrons de façon à compléter leur couche électronique extérieure.

La Figure 3-1 correspond au cas du chlore : Cl = 17

L'atome de chlore possède 7 électrons sur sa couche périphérique, la mise en commun d'un électron de chaque atome entraîne une liaison covalente entre les deux atomes.

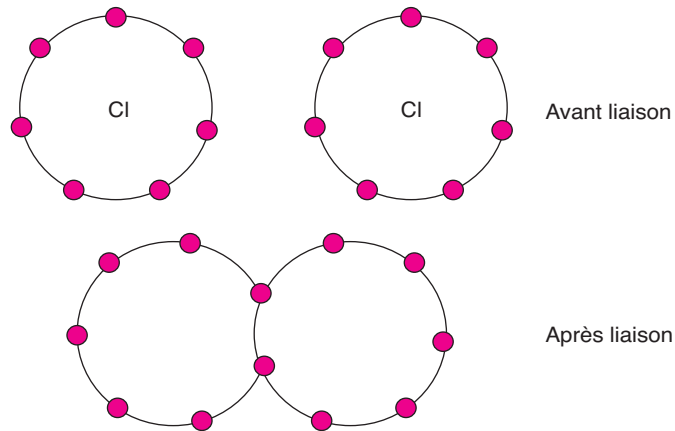


Figure 3-1

Propriétés des liaisons covalentes :

- Liaisons fortes et très directionnelles (exemple carbone diamant).
- La position et le nombre des atomes sont fixés par la configuration électronique et ne peuvent varier ; il n'y donc pas de déformation plastique possible.
- Matériaux fragiles, se rompant sans déformation.
- Structures très dirigées (cas des composés organiques), plutôt en ligne -C-C-C.
- Structures légères et peu compactes.

b) La liaison ionique

Les atomes liés par des liaisons ioniques (création d'ions positifs et négatifs) perdent ou gagnent un ou plusieurs électrons périphériques pour compléter leur couche extérieure. La liaison résulte de l'attraction entre les ions de charges opposées.

Dans le cas du fluorure de lithium LiF (Figure 3-2), l'atome de lithium perd un électron périphérique qui vient compléter la couche externe de fluor.

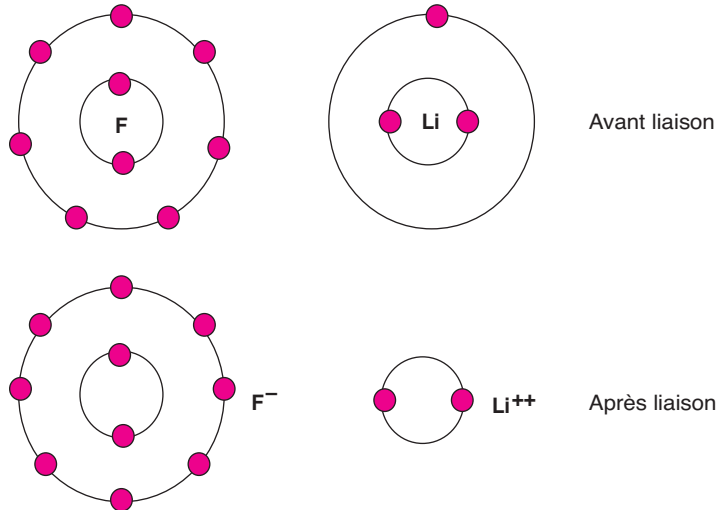


Figure 3-2

Suivant le rapport entre le rayon anionique (R_a) et cationique (R_c) on aura tendance à former :

- une structure cubique si $R_c/R_a > 0,73$ (CsCl)
- une structure cubique à faces centrées si $0,41 < R_c/R_a < 0,73$ (NaCl)
- une structure hexagonale $0,23 < R_c/R_a < 0,41$ (ZnS)

Propriétés des liaisons ioniques :

- La liaison ionique est une liaison forte. C'est le cas de nombreux composés tels que les oxydes métalliques (Al_2O_3 , MgO, CaO).
- Les liaisons sont souvent non orientées et compactes.
- Isolants thermiques (électrons localisés) et électriques ; sensibles aux chocs thermiques et mécaniques.
- Stabilité chimique.
- Température de fusion élevée.
- Masse volumique faible.

Les céramiques (souvent association de métaux et non métaux) sont formées de liaisons ioniques et covalentes.

c) La liaison métallique

La liaison métallique (Figure 3-3) se caractérise par la mise en commun des électrons de liaison qui sont répartis dans l'ensemble du réseau d'ions.

Les métaux sont constitués d'ions dans des positions déterminées (Fiche 8), formant ainsi un réseau cristallin et baignent dans un nuage électronique.

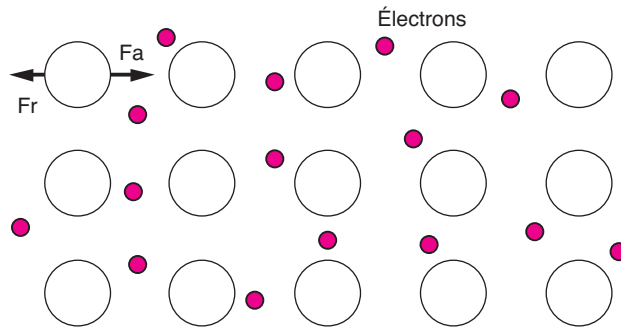


Figure 3-3

La position des ions correspond à la résultante entre forces d'attraction (F_a) et de répulsion (F_r) qui s'exercent entre ces ions positifs et le nuage électronique délocalisé : c'est le modèle électrostatique (Figure 3-4).

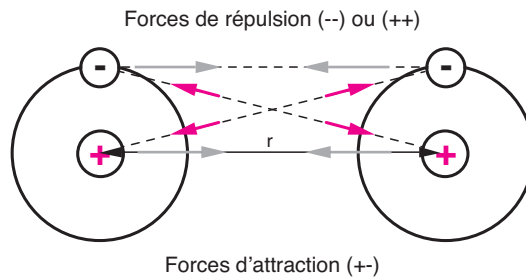


Figure 3-4

On considère deux atomes : les charges électriques de même signe créent un potentiel de répulsion U_r (gris) et les charges de signes opposés un potentiel d'attraction U_a (rouge). Le potentiel résultant est $U_r + U_a = U$. Si on représente cette somme sous la forme d'un graphe (Figure 3-5), le potentiel d'équilibre correspond à U_0 pour une distance r_0 (distance d'équilibre). Cette distance correspond à un état d'énergie minimale.

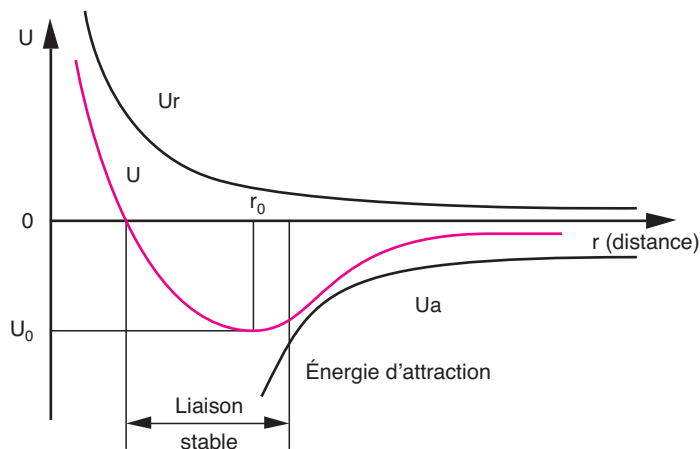


Figure 3-5

Dans la liaison métallique, on peut considérer que deux atomes sont reliés par un « ressort » (Figure 3-6). Ce ressort va caractériser le Module de Young (Fiche 11) du matériau. Le ressort doit rester dans son domaine « élastique » (c'est-à-dire revenir à sa position initiale quand $F = 0$) pour une distance maximale entre les deux atomes (r_e) qui est à relier avec sa limite d'élasticité (σ_e).

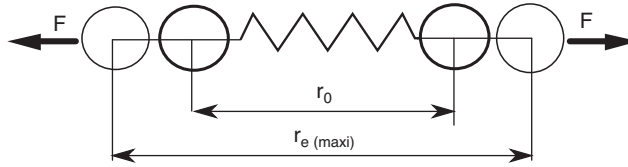


Figure 3-6

Si la force entre les deux atomes est $F = -k (r_e - r_0)$ k constante de raideur

$$k = \frac{dF}{dr} = \left[\frac{d^2U}{dr^2} \right]$$

Force à exercer par unité d'aire pour écarter les deux plans atomiques.

$$\sigma = Nk(r - r_0) = \frac{k}{r_0} \cdot \frac{r - r_0}{r_0} = \frac{k}{r_0}$$

On prend N le nombre de liaisons par unité d'aire

$$N = \frac{1}{r_0^2} \text{ or } \sigma = E\varepsilon \Rightarrow E = \frac{k}{r_0}$$

Propriétés des liaisons métalliques :

- Comme les deux précédentes liaisons, il s'agit d'une liaison forte. La mobilité du nuage électronique qui se déplace à l'intérieur de la structure conduit à une certaine flexibilité du réseau ce qui permet l'existence de certains défauts (lacunes). Ce sont ces défauts qui sont à la base de nombreuses propriétés très utiles des métaux, en particulier de leur déformation plastique, c'est-à-dire de la ductilité.
- Bonne conductibilité thermique et électrique liée à l'existence **d'électrons libres**.

4 Les matériaux organiques

Mots-clés

Polymères, Caoutchouc, Thermoplastique, Thermodurcissable, Recyclage.

Les polymères se retrouvent souvent dénommés « plastique » de part leur comportement mécanique. On parlera plutôt d'un comportement viscoélastique et viscoplastique. Les polymères peuvent être fabriqués à partir d'un seul monomère (homopolymère) ou de plusieurs monomères (copolymères). Parmi les différents polymères, on distingue principalement : les thermoplastiques, les thermodurcissables et les élastomères (nommés caoutchouc). Les polymères peuvent être naturels (cellulose, caoutchouc), artificiels (acétate de cellulose) ou synthétiques (ce sont les plus nombreux). Les polymères présentent plusieurs avantages dont une faible densité, une mise en forme aisée et un recyclage aisé. La chimie des polymères est principalement basée sur les principes de la chimie organique (C, H, O,...).

1. STRUCTURE DES DIFFÉRENTS POLYMÈRES

a) Définition

Les polymères, (du grec « polus » plusieurs, et « meros » partie) qu'ils soient homopolymères ou copolymères sont composés de l'enchaînement répété d'un ou plusieurs monomères reliés les uns aux autres principalement par des liaisons covalentes.

Exemple

le monomère : l'éthylène $\text{CH}_2=\text{CH}_2$

le polymère (homopolymère) : le polyéthylène (PE) $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$

n est appelé indice de polymérisation

le monomère : le chlorure de vinyle $\text{CH}_2=\text{CHCl}$

le polymère : le polychlorure de vinyle (PVC) $(-\text{CH}_2-\text{CHCl})_n$

b) Structure des polymères

Les polymères sont constitués de chaînes linéaires (Figure 4-1) plus ou moins longues (de quelques nm à 1 mm) avec ou sans ramifications. On parlera de chaînes linéaires (A), de polymères ramifiés (B) et de polymères tridimensionnels (C).

Les chaînes de polymères ainsi constituées (Figure 4-2) peuvent présenter :

- une structure amorphe (A) avec un enchevêtrement de chaînes non orientées,
- une structure amorphe orientée. (B) L'orientation axiale des fibres conduit généralement à des propriétés mécaniques et optiques intéressantes
- une structure semi-cristalline (C). On observe la présence de cristallites dans le réseau amorphe du polymère. Ces cristallites présentent des systèmes cristallins différents suivant le polymère. Dans ce cas, on observe en diffraction des rayons X (Fiche 16) des pics caractéristiques, contrairement aux structures amorphes lesquelles ne présentent aucun pic.

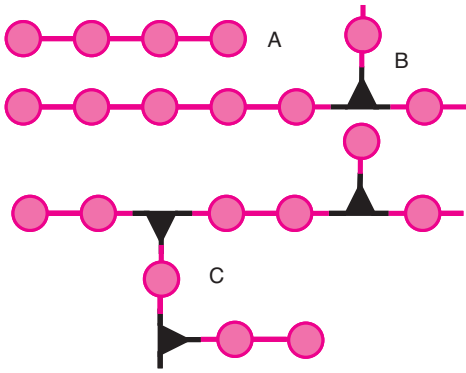


Figure 4-1

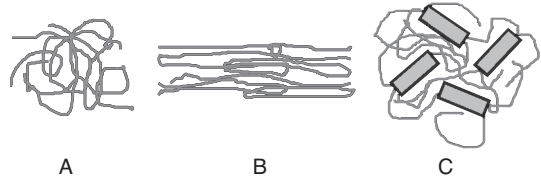


Figure 4-2

Le Tableau 4-1 présente quelques polymères avec le motif du monomère, leurs applications et le sigle de recyclage affecté à ce polymère.

Nom du polymère et sigle usuel	Monomère	Application	Sigle de recyclage
Polyéthylène (PE)	$-\text{CH}_2-\text{CH}_2-$	Sacs plastiques (PEHD) flacons emballages Films et gaines thermorétractables	04 PE-LD
Polyméthacrylate de méthyle (PMMA)	$-\text{CH}_2-\text{C}(\text{CH}_3)(\text{COOCH}_3)-$	Plaques transparentes pour vitres	07 O
Polystyrène (PS)	$-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{C}_6\text{H}_5)-$	Isolant thermique PS alimentaire (emballages) PS cristal (boîtes CD)	06 PS
Polypropylène (PP)	$-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)-$	Flacons Emballages Pare-chocs Pièces pour l'industrie automobile	05 PP
Polychlorure de vinyle (PVC)	$-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{Cl})-$	Rigide : Tuyauterie Souple : imperméables Isolant électrique	03 PVC
Polytétrafluoroéthylène (PTFE)	$-\text{CF}_2-\text{CF}_2-$	Revêtements antifrictions (Téflon) Moule alimentaire	07 O

Tableau 4-1

c) Familles de polymères

■ Les thermoplastiques

Les polymères thermoplastiques (thermoformables) issus de la polymérisation par addition, se déforment et sont façonnables sous l'effet de la chaleur, gardant cette forme en refroidissant (analogie avec la cire des bougies). Ce phénomène réversible permet leur recyclage : les objets sont broyés et « refondus » pour en élaborer d'autres.

Les thermoplastiques sont par ailleurs solubles dans des solvants spécifiques, ce qui permet leur utilisation comme revêtements et colles.

Exemples de Thermoplastiques avec désignation commerciale

ABS : Ugikral, Terluran

PA (Polyamides) : Nylon, Nylatron, Rilsan, Grilamid, Zytel, Vestamid

PC : Lexan, Makrolon, Axxis

PE : Cestilène, Cesticolor, Céstidur, Cestilite,

PMMA : Altuglas, Oroglas, Lucite, Plexiglas,

PS : Hostapor, Lacqrène Styréniq

PTFE : Fluon, Hostaflon, Téflon Fluoré

PVC : Hostalit, Lucovyl, Vestolit, Vinnol Vinylique

■ Les thermodurcissables

Les polymères thermodurcissables prennent leur forme définitive après la réaction chimique (polymérisation par condensation) accompagnant leur transformation. Le réseau tridimensionnel obtenu donne au produit fini son caractère d'irréversibilité thermique.

Exemples de Thermoplastiques avec désignation commerciale

EP : Araldite, Devcon, Epikote, Epotek Époxyde

MF : Formica Aminoplaste : mélamine-formaldéhyde

PF : Bakélite, toile bakélisée (Celoron)

■ Les élastomères

Les élastomères, polymérisés par galvanisation, sont hautement déformables : ils se caractérisent par leur faculté de supporter de grandes déformations (jusqu'à environ 1 000 %) avant rupture.

Les élastomères sont des polymères à caractère amorphe ou cristallin présentant des propriétés remarquables en élasticité, amortissement et étanchéité (air, eau). Ils sont thermoplastiques et deviennent thermodurcissables par vulcanisation. Le plus connu des élastomères est le caoutchouc naturel (NR : Natural Rubber).

2. LES PROPRIÉTÉS DES POLYMÈRES

a) Traction à la température ambiante

Suivant la nature du polymère les courbes de traction (Fiche 11) présentent des caractéristiques différentes. La figure 4-3 présente les courbes de quatre polymères et élastomères.

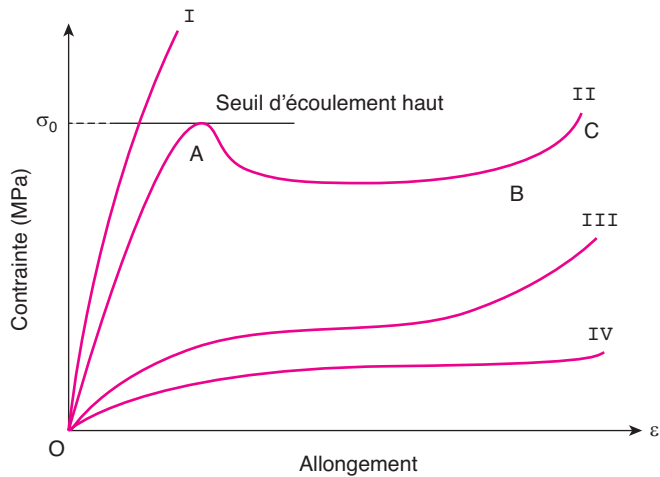


Figure 4-3

La courbe I caractérise un polymère à caractère fragile correspondant à un polymère très fortement cristallin ou encore un polymère thermodurcissable.

La courbe II caractérise un matériau viscoélastique présentant un seuil d'écoulement. La courbe peut être découpée en trois phases distinctes :

- **le domaine élastique et anélastique OA.** C'est un domaine de déformation homogène qui se termine au niveau du seuil d'écoulement. La pente caractérise le module de Young (E).
- **Le plateau d'écoulement :** peu après le seuil d'écoulement, on assiste à la formation d'un plateau (AB). La striction se propage le long de l'éprouvette en transportant une déformation appelée taux de déformation naturelle.
- **Le durcissement :** il démarre lorsque la striction s'est propagée sur la totalité de l'éprouvette. Dans cette partie qui conduit à la rupture (BC) la déformation redevient homogène.

La courbe III présente la courbe d'un matériau viscoélastique sans seuil d'écoulement.

La courbe IV est caractéristique d'un comportement viscoplastique correspondant à un élastomère (caoutchouc) : dans ce cas il y a réversibilité.

Le Tableau 4-2 donne les propriétés mécaniques de quelques polymères

Polymère	Masse volumique (g/cm ³)	Module de Young* (MPa)	Limite d'élasticité** (MPa)	Résistance maximale (MPa)	Allongement à la rupture (%)
PE (HD)	0,95	500	20	20 - 37	700 - 1 000
PVC	1,5	2 400	40	40 - 60	10 - 50
PFTE	2,2	400	20	17 - 35	300
PP	0,9	1 200	30	30 - 70	200 - 1 000
PS	1,05	3 000	35	35 - 70	2
PMMA	1,2	3 000	50	50 - 90	5
Nylon	1,15	2 000	75	75 - 95	60