

## Chapitre I

# INTRODUCTION

## 1- MATERIAUX ANCIENS ET MATERIAUX MODERNES

Toutes les grandes étapes du développement de l'humanité sont repérées par les archéologues à partir des matériaux utilisés par les hommes : Age de pierre, Age du bronze, Age du fer.

Pendant tout le Moyen Age on ne disposait que d'un nombre limité de matériaux : céramiques (briques et tuiles), pierres, liants (chaux puis chaux hydraulique), plomb, matériaux cuivreux, fer puis fonte, bois, cuir...

Au XVIII<sup>ème</sup> on a commencé à s'intéresser aux propriétés des matériaux et l'on pourrait parler d'un Age de la compréhension. Cet âge est marqué, par exemple, par les travaux de Lavoisier <sup>1</sup> et par les débuts de la chimie.

A la fin du XIX<sup>ème</sup> et au début du XX<sup>ème</sup> siècle on a introduit des matériaux nouveaux comme le fer avec Eiffel <sup>2</sup>, l'acier, le béton puis le béton armé. Le béton armé, alors appelé ciment armé, est l'un des premiers composites industriels (le bois est le premier composite naturel) ; l'étape suivante a été l'invention du béton précontraint par Freyssinet <sup>3</sup> qui a bouleversé notre manière de construire. On s'est très vite rendu compte que pour chaque matériau il fallait adapter conception, forme et aspect des réalisations (design) pour exploiter au mieux ses propriétés et ne pas chercher à imiter les réalisations déjà faites avec d'autres matériaux.

Dans certains cas, seul l'emploi de matériaux nouveaux a permis l'émergence de nouvelles techniques. Par exemple, le radar n'a pu se développer, au début de la seconde guerre mondiale, que conjointement avec la mise au point du polyéthylène, bien meilleur isolant que la gomme-laque utilisée jusqu'alors en électrotechnique. L'électronique moderne est le fruit de la mise au point des matériaux semiconducteurs et le succès des techniques biomédicales doit beaucoup aux biomatériaux. Les matériaux nouveaux permettent de faire sauter des verrous technologiques.

Certains auteurs estiment que l'on est actuellement dans l'Age des nouveaux matériaux. Ce succès a été rendu possible par la création d'une discipline appelée Science des Matériaux qui a su intégrer les progrès de la physique et de la chimie des solides. La science des matériaux permet

---

<sup>1</sup> Antoine Laurent de Lavoisier : chimiste français (1743-1794), auteur de nombreux travaux dans les domaines de la chimie, de la physique ou de la métrologie. Il a expliqué le mécanisme de la prise du plâtre.

<sup>2</sup> Gustave Eiffel : ingénieur français (1832-1923), réalisateur de nombreuses constructions métalliques : viaduc de Garabit en 1882, tour Eiffel en 1889.

<sup>3</sup> Eugène Freyssinet : ingénieur français (1879-1962), inventeur du compactage et de la précontrainte du béton.

d'expliquer les propriétés des matériaux, de les améliorer et d'en concevoir de nouveaux (ingénierie des matériaux) ; elle a établi les relations entre propriétés macroscopiques et microstructure.

On ne doit toutefois pas s'imaginer qu'il n'y ait autour de nous que des matériaux nouveaux car, parallèlement au développement de ces derniers, les matériaux traditionnels se sont améliorés et ont progressé. Dans l'automobile les polymères ont supplanté des matériaux comme le bois et certains alliages de fonderie à base de zinc. Ils se sont rendus indispensables pour la réalisation de nombreux composants mécaniques ou électromécaniques ou d'éléments de protection (pare-chocs). Malgré cette percée le reste des véhicules reste essentiellement constitué d'acier, de fonte et d'aluminium. Ceci s'explique par l'amélioration des traitements anticorrosion, l'augmentation des limites élastiques des matériaux, la mise au point de nouveaux procédés de formage et d'assemblage, les normes de sécurité (crash-tests) et les facilités de recyclage présentées par certains matériaux. On parle de matériaux traditionnels en mutation.

## 2- CLASSIFICATION DES MATERIAUX

Les matériaux, traditionnels ou nouveaux, peuvent être classés de deux manières :

- selon leur microstructure ;
- selon leur emploi.

### 2.1. Classement des matériaux selon leur microstructure

En examinant les objets et constructions de notre entourage on trouve des matériaux naturels : bois, minéraux, cuir... et des matériaux artificiels qui se répartissent en trois classes : métaux et alliages métalliques, polymères et céramiques <sup>4</sup>.

- Les métaux et alliages sont généralement ductiles et tenaces. Ce sont des matériaux cristallins dans lesquels les atomes sont alignés régulièrement dans les trois dimensions. Leurs propriétés (conduction thermique et électrique, opacité et éclat métallique) découlent de la nature de la liaison métallique qui assure leur cohésion.
- Les céramiques sont formées d'oxydes qui conduisent aux céramiques traditionnelles (faïence, porcelaine, verres et ciments) et aux céramiques avancées (alumine, zircone...), ainsi que de non-oxydes (carbone cristallin, carbures, nitrures). Les céramiques sont généralement dures et fragiles, elles sont mauvaises conductrices de la chaleur et de l'électricité ; certaines peuvent être transparentes. Ce sont des matériaux qui peuvent être cristallins (alumine, zircone...) ou non-cristallins. Dans les matériaux non-cristallins les atomes sont répartis aléatoirement (cas des verres). On pourrait dire que les matériaux cristallins sont ordonnés et que les matériaux non-cristallins sont désordonnés mais en fait aucun matériau n'est, ni totalement ordonné, ni totalement désordonné. On verra qu'il est

---

<sup>4</sup> Lu au Musée de la Villette : *C'est quand on veut toucher du bois que l'on prend conscience que le monde est fait de plastiques, métaux et céramiques (Loi de Murphy).*

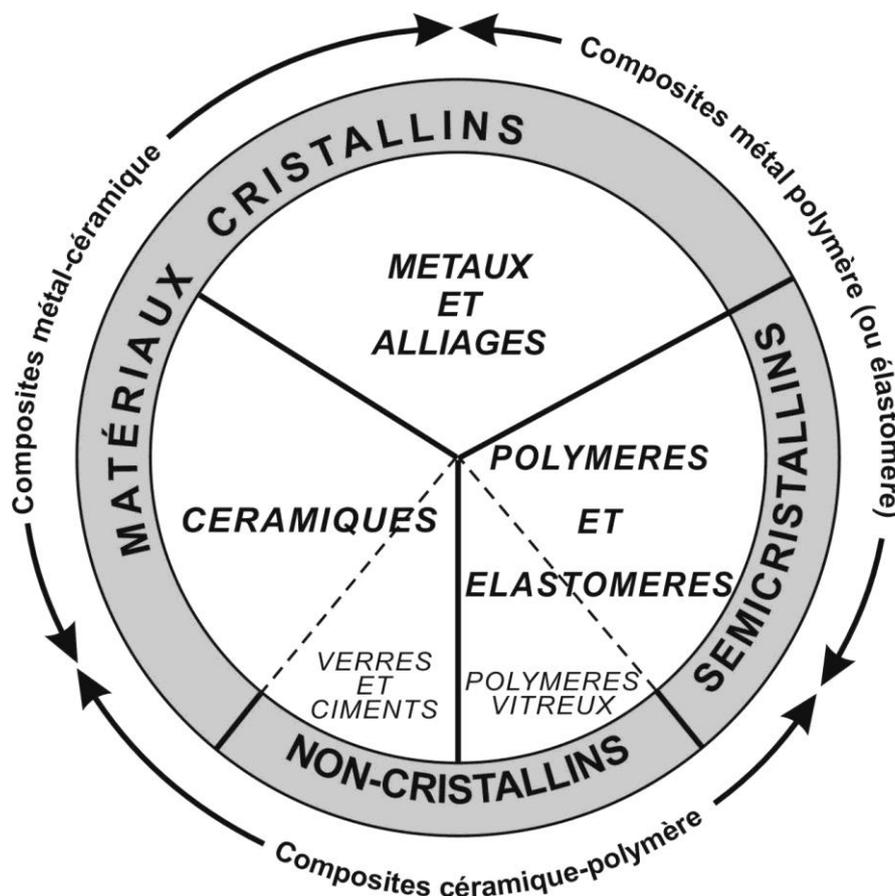
préférable de parler d'ordre à grande distance et d'ordre à courte distance. Les céramiques tirent leurs propriétés des liaisons fortes entre leurs atomes : liaisons covalentes et liaisons ioniques.

- Les polymères peuvent contenir des domaines cristallins dans une matrice non-cristalline ; selon l'importance relative de ces domaines on parle de polymères semicristallins ou de polymères vitreux. Les liaisons entre atomes sont constituées d'une association de liaisons fortes (liaisons covalentes) et de liaisons faibles (liaison hydrogène, forces de Van der Waals).

**Remarques :**

- Les verres sont non-cristallins mais certains d'entre eux peuvent cristalliser (dévitrification).
- Les métaux sont normalement cristallins, il existe toutefois des verres métalliques.
- Aux trois classes, on peut ajouter les semi-conducteurs qui sont des matériaux cristallins à liaisons essentiellement covalentes.

La figure I.1 rappelle les trois classes de matériaux et les trois classes de microstructures correspondantes :



**Figure I-1.** Au centre on trouve les trois grandes familles : métaux et alliages, polymères et élastomères, verres et céramiques ; ces trois familles ont des propriétés particulières que l'on découvrira dans la suite mais on doit dès maintenant comprendre que ces propriétés sont induites par la microstructure qui peut être cristalline, semicristalline ou non-cristalline. En associant les matériaux deux à deux on obtient des matériaux composites qui réunissent alors plusieurs propriétés.

En associant des matériaux dont les caractéristiques sont complémentaires on peut réaliser des matériaux composites polyphasés qui possèdent des propriétés supérieures à celles des constituants initiaux. Par exemple :

- Le béton armé est un composite métal-céramique dans lequel l'acier supporte les contraintes de traction alors que le béton ne peut essentiellement supporter que les contraintes de compression.
- Un pneumatique est un composite élastomère-acier dans lequel l'élastomère assure la fonction roulement et le fil d'acier la résistance mécanique.

## 2.2. Classement des matériaux selon leur emploi

On distingue :

- Les matériaux de structure ;
- Les matériaux de fonction.

### 2.2.1 - Matériaux de structure

Les matériaux de structure, ou *les matériaux à fonction structurale*, sont *principalement destinés à résister, sans subir de déformation excessive et sans se rompre, à des sollicitations mécaniques*<sup>5</sup>. Ils doivent également résister à toutes les formes de détérioration (vieillesse, corrosion), avoir un coût raisonnable, permettre une bonne mise en œuvre, être esthétiques, pouvoir être obtenus en respectant l'environnement et être recyclables. Ils correspondent aux trois classes : métaux, polymères et céramiques ainsi qu'aux composites.

Ce sont les matériaux de la construction mécanique, de la construction des bâtiments et des ouvrages d'art, des transports (automobile, aéronautique, espace, transports ferroviaires et maritimes) dont ils sont les acteurs des performances. Ce sont aussi les matériaux de l'emballage (boîtes boisson par exemple). Ils sont en perpétuelle évolution (mise au point permanente de nouvelles nuances d'alliages, de nouveaux composites) et se développent en synergie avec le secteur des traitements de surface.

Parallèlement à l'évolution des matériaux de structure, on cherche :

- à faire évoluer les techniques d'assemblage (maîtrise de l'adhésion-collage, emploi du soudage laser...) ;
- à privilégier toute solution compatible avec la mise en œuvre dans des ateliers flexibles ;
- à favoriser le développement des méthodes de contrôle non destructif pour permettre une meilleure fiabilité ;
- à prévoir leur recyclage ;
- à mieux cerner les propriétés afin de les modéliser pour intégrer le comportement des matériaux dans les logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO).

### 2.2.2 - Matériaux de fonction

Les matériaux de fonction sont des *matériaux conçus, élaborés et mis en forme pour remplir une fonction associée à une propriété spécifique, physique -*

---

<sup>5</sup> Y. Brechet, A. Mortensen, l'Actualité Chimique, mars 2002.

*optique, électrique ou magnétique - chimique ou électrochimique, et intervenant dans un dispositif ou un système* <sup>6</sup>.

Les matériaux de fonction, comme les matériaux de structure se retrouvent dans les métaux, les polymères, les céramiques et les composites

En fonction des propriétés spécifiques, on peut donner quelques exemples de classes de matériaux fonctionnels :

- Propriétés magnétiques : aimants et matériaux pour circuits magnétiques...
- Propriétés électriques : conducteurs, semi-conducteurs, supraconducteurs, matériaux piézo-électriques...
- Propriétés optiques : matériaux pour l'optique, pour l'optoélectronique...
- Propriétés biologiques : biomatériaux pour tous les implants utilisés en ophtalmologie, en chirurgie cardiaque, en chirurgie ostéoarticulaire (plaques, implants, prothèses, ciments de scellement...)...

Que le matériau soit un matériau de structure ou un matériau fonctionnel, on n'obtiendra les propriétés recherchées que si l'on sait le préparer et le mettre en œuvre convenablement. Le comportement d'un matériau magnétique de qualité utilisé en couche mince ne sera que le reflet de la qualité de la couche mince. Un béton à hautes performances n'aura la résistance prévue que si la mise en œuvre est correcte. On doit toujours associer matériaux et procédés.

### 3- PLAN DE L'OUVRAGE

L'objectif est d'aborder les propriétés générales des matériaux en allant de la microstructure vers la macrostructure pour les trois classes : matériaux cristallins, matériaux amorphes et matériaux semi-cristallins. Le texte est divisé en trois grandes parties :

- Partie A : De la microstructure à la macrostructure des matériaux.
- Partie B : Transitions de phases dans les matériaux.
- Partie C : Essais mécaniques et lois de comportement des matériaux.

Dans la **première partie**, on présente les forces qui lient les atomes entre eux et on montre comment ils s'associent pour former des microstructures solides plus ou moins ordonnées. On montre ensuite que la microstructure des solides en gouverne les principales propriétés macroscopiques. On termine en présentant les méthodes qui permettent de caractériser et d'observer les microstructures et les macrostructures des matériaux, rendant concrets les concepts qui viennent d'être introduits.

Dans la **deuxième partie**, on s'intéresse aux changements de phases que les matériaux cristallins, métaux, alliages et céramiques, subissent pendant leur élaboration ou pendant leur mise en œuvre. Même à l'état solide certains de ces matériaux présentent également des transformations. Les matériaux non cristallins (polymères et verres) ne montrent pas de changements de phases <sup>7</sup> tels que fusion ou la solidification. Ils subissent néanmoins des changements de leurs propriétés (par exemple la viscosité) sous l'action de la température, lors de transitions (transition vitreuse). Toutes les évolutions possibles ont en commun

---

<sup>6</sup> M. Pouchard, l'Actualité Chimique, mars 2002.

<sup>7</sup> Selon la définition classique de Gibbs, une phase est une partie homogène de matière.

la recherche d'une meilleure stabilité par diminution de l'énergie libre, conformément aux lois de la thermodynamique.

La **troisième partie** est consacrée à l'étude des propriétés mécaniques, statiques et dynamiques ; l'aboutissement est la synthèse de ces propriétés sous la forme très générale de lois de comportement qui correspondent à la réponse d'un matériau sous l'effet d'une sollicitation mécanique. Ces lois permettent d'effectuer des comparaisons entre les trois classes de matériaux.

Les thèmes abordés préparent à l'étude des monographies sur les matériaux, qu'elles concernent les matériaux de structure ou les matériaux fonctionnels.

# Partie A

## DE LA MICROSTRUCTURE A LA MACROSTRUCTURE DES MATERIAUX

### Chapitre II

## ELEMENTS DE PHYSIQUE ATOMIQUE

Quelques 400 ans avant J.C le philosophe grec Démocrite <sup>8</sup> émit l'idée que *l'Etre est constitué d'une infinité d'atomes*. Pendant 22 siècles on a utilisé des matériaux constitués d'atomes sans qu'on sache comment ils étaient liés entre-eux. En 1895, J.J. Thomson <sup>9</sup> découvre l'électron et il faudra encore une grande partie du XX<sup>ième</sup> Siècle pour comprendre la structure des atomes et le rôle des électrons dans les liaisons interatomiques.

Les propriétés macroscopiques des matériaux s'interprètent à partir de la connaissance de leur structure à l'échelle atomique. Il faut connaître la nature et l'intensité des forces qui retiennent les atomes entre eux (liaisons) et la manière dont les atomes sont empilés (microstructures).

En étudiant les liaisons on est amené à distinguer les liaisons fortes (qui supportent 1000 à 5000 K sans être détruites) et les liaisons faibles (qui ne supportent que 100 à 500 K). En étudiant les microstructures on trouve une grande diversité dans la manière d'associer les atomes.

Il n'est pas possible de comprendre les principes et la diversité de ces liaisons et de ces structures sans faire appel aux outils quantiques découverts au début du XX<sup>ième</sup> Siècle ; nous commencerons donc par présenter les bases essentielles de ces outils.

La mécanique quantique gouverne l'arrangement des couches électroniques et, en particulier, la couche des électrons de valence ; cette dernière couche électronique impose le type de liaison de l'atome avec ses voisins.

La mécanique classique concerne des systèmes macroscopiques dans lesquels l'énergie est distribuée de manière continue ; la mécanique quantique concerne des systèmes microscopiques dans lesquels l'énergie est distribuée par niveaux discrets, séparés par des domaines interdits.

---

<sup>8</sup> Démocrite : philosophe grec né à Abdère (≈ 460 à ≈ 370 av. J.C.).

<sup>9</sup> Sir Joseph John Thomson : physicien anglais né près de Manchester (1856-1940), prix Nobel en 1906.

## 1- BASES DE LA MECANIQUE QUANTIQUE

### 1.1. Equivalence masse – énergie

L'énergie intrinsèque d'une masse  $m$  est donnée par la relation d'Einstein <sup>10</sup> :

$$E = mc^2 \quad (\text{II.1})$$

$c = 2,997.10^8 \text{ m.s}^{-1}$  (vitesse de la lumière)

Cette formule permet, par exemple, de calculer l'énergie fournie par une réaction nucléaire : dans la fission d'un noyau lourd on observe une perte de masse  $\Delta m$  correspondant à la libération d'énergie  $\Delta mc^2$ .

### 1.2. Dualité ondes – corpuscules

Ce concept fondamental résulte des travaux de Planck <sup>11</sup> (1900) sur l'interprétation de la distribution spectrale du rayonnement émis par les corps noirs (l'échange d'énergie entre un rayonnement électromagnétique de fréquence  $\nu$  et la matière ne peut pas s'effectuer de manière continue mais, au contraire, par échanges d'un multiple entier d'une valeur  $h\nu$ , appelée quantum d'énergie) et de ceux d'Einstein (1905) sur l'effet photoélectrique. Ces travaux montrent que la lumière se présente simultanément sous un double aspect :

- *ondulatoire* : on peut réaliser des interférences lumineuses,
- *corpusculaire* : les échanges d'énergie se font par quanta <sup>12</sup> d'énergie ou photons.

Le photon est la particule associée à une onde lumineuse de longueur d'onde  $\lambda$  (et à toutes les ondes électromagnétiques : rayons X, rayons  $\gamma$ ), sa masse est nulle et il se déplace à la vitesse de la lumière. Lors de sa création un photon dispose d'une énergie cinétique donnée par la relation de Planck :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (\text{II.2})$$

$\nu$  = fréquence,  $h$  = constante de Planck =  $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

D'une manière générale on caractérise une particule en mouvement, de masse  $m$  et de vitesse  $\vec{v}$  par son énergie,  $E$ , et par son impulsion,  $\vec{p} = m\vec{v}$ , appelée aussi quantité de mouvement. La mécanique classique indique qu'au sein d'un système isolé il y a, en cas de choc, conservation de l'énergie et de l'impulsion. Dans ses travaux sur la relativité, Einstein a montré que les principes de la mécanique classique restent valables à condition que l'on tienne compte de la variation de masse des particules en fonction de leur vitesse :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad (\text{II.3})$$

$m_0$  est la masse de la particule au repos. L'impulsion doit s'écrire :

<sup>10</sup> Albert Einstein : physicien allemand naturalisé américain (1879-1955), prix Nobel en 1921.

<sup>11</sup> Max Planck : physicien allemand né à Kiel (1858-1947), prix Nobel en 1918.

<sup>12</sup> un quantum, des quanta