

CHAPITRE I

CLASSIFICATION DES MATERIAUX ET LEURS PROPRIETES

I.1 INTRODUCTION

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 cuivre (chalcolitique) , Age du bronze, Age du fer dans lequel nous vivons encore.

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 18^{ième} 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 et par les débuts de la chimie.

A la fin du 19^{ième} et au début du 20^{ième} siècle on a introduit des matériaux nouveaux comme le fer avec Eiffel, 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 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. L'électronique moderne est le fruit de la mise au point des matériaux semi conducteurs 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 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. Il existe sur le marché des milliers de matériaux différents. Lors de la fabrication d'un objet technique, il importe de choisir celui qui répondra le mieux à nos besoins en fonction des caractéristiques qu'il possède. Il existe plusieurs catégories de matériaux différents, tels que les matériaux organiques (bois, papier, laine, etc.), le verre, la pierre, le métal, les plastiques, la céramique, les textiles ainsi que plusieurs matériaux synthétiques. Tous ces matériaux se distinguent les uns les autres par leur origine, naturelle ou artificielle, et par leurs caractéristiques.

I.2 DÉFINITION

Un **matériau** est une substance ou une matière d'origine naturelle ou artificielle utilisée par l'homme pour la fabrication d'objets. C'est donc est 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 II montre ces interactions.

Les propriétés recherchées du matériau peuvent être : mécanique, chimique, thermique, optiques, électroniques, économiques....etc.

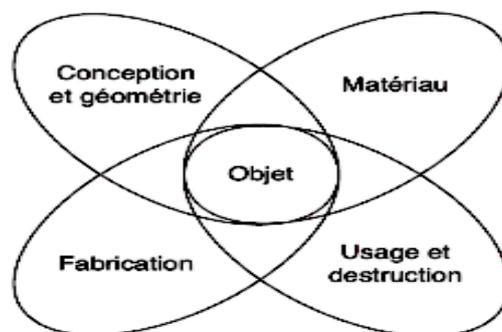


Figure II : Interaction aboutissant à un objet.

I.3 PROPRIÉTÉS

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

- leur **composition chimique** (*nature* des espèces atomiques 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 I.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 , 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.

– 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} poiseilles (Pl) ou $\text{Pa} \cdot \text{s}$

– 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 de 10^{-3} ou 10^{-4} 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.

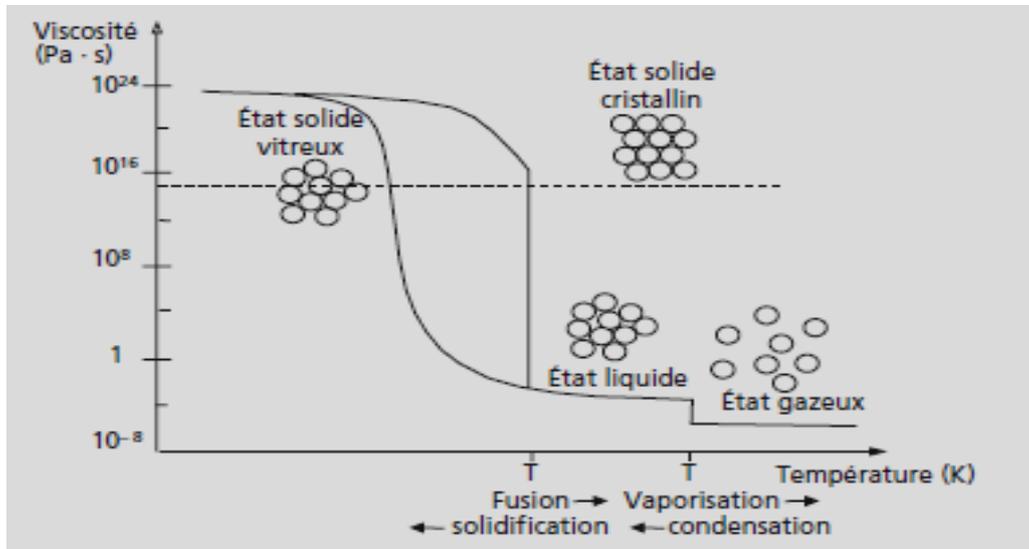


Figure I.2 Changements d'état de la matière en fonction de la température

La **pression** joue également un rôle dans les changements d'état de la matière (figure I.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).

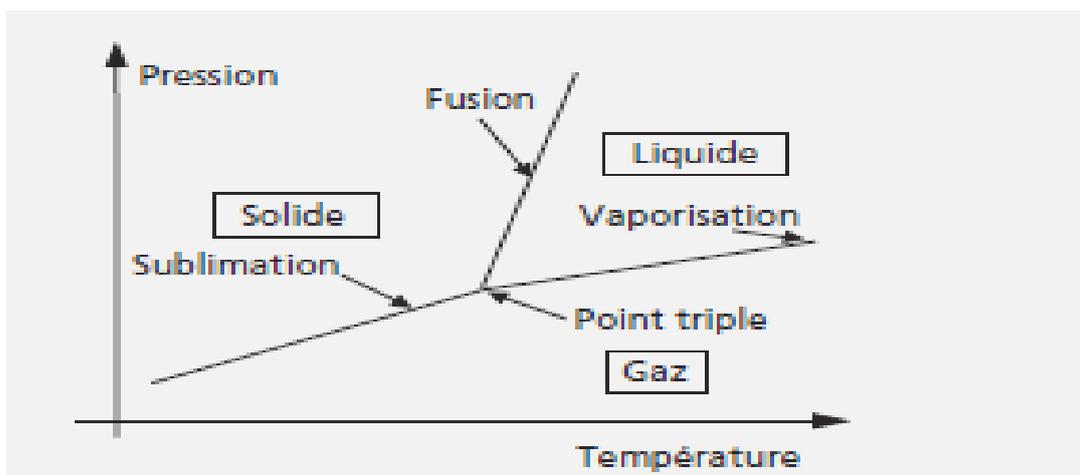


Figure I.3 Variation des états physiques en fonction de la pression et de la température

Les matériaux étant destinés à la réalisation d'objets capables de résister aux manipulations et au moins aux sollicitations de leur propre poids, la figure I.4 illustre les types de sollicitations subies par un matériau en service.

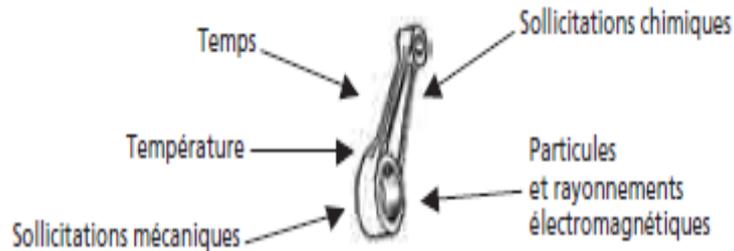


Figure I.4 Types de sollicitations subies par un matériau en service.

I.4 CHOIX D'UN MATERIAU

Le choix d'un matériau, dans une utilisation, dépend de plusieurs critères :

- ✓ Caractéristiques mécaniques : limite élastique, dureté, résilience, ténacité, ductilité...
- ✓ Caractéristiques physico-chimiques : masse volumique, point de fusion, conductibilité électrique et conductibilité thermique, comportement à la corrosion, vieillissement...
- ✓ Caractéristiques de mise en oeuvre : usinabilités, soudabilité, trempabilité...
- ✓ Caractéristiques économiques : prix, disponibilité, expérience industrielle

I.5 CLASSIFICATION DES MATERIAUX

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

- selon leur microstructure ;
- selon leur emploi.

I.5.1. Classement des matériaux selon leur microstructure

En examinant les objets et constructions de notre entourage on trouve des matériaux :

D'origines naturelles comme :

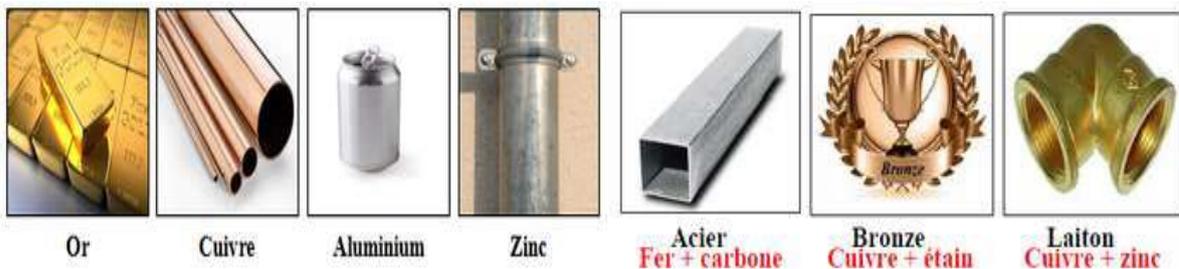
- les minéraux : ils sont extraits du sol (eau, terre, sable...)
- les organiques d'origine végétale (bois, coton, lin...)
- les organiques d'origine animale (laine, viande, lait, corne...)

D'origines artificielles comme :

- les métaux que l'on extrait à partir des minéraux (cuivre, zinc, argent, aluminium, plomb...)
- les alliages qui sont des mélanges de plusieurs métaux (bronze, laiton, zamac...)
- les plastiques que l'on crée à partir d'éléments naturels comme le bois, le charbon et le pétrole... (PVC, caoutchouc, polystyrène, polyamide, Nylon...)

Ces matériaux se répartissent en trois classes : métaux et alliages métalliques, polymères et céramiques.

- **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.



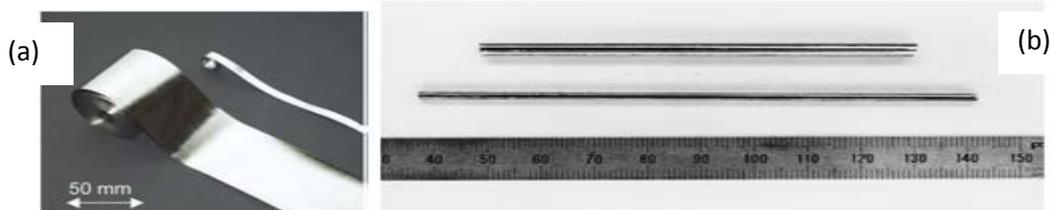
Dans les matériaux non-cristallins les atomes sont répartis aléatoirement (cas des verres). On pourrait dire que les matériaux cristallins sont ordonnés et que les matériaux non-cristallins sont désordonnés mais en fait aucun matériau n'est, ni totalement ordonné, ni totalement désordonné. **Les céramiques** 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 semi-cristallins 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).



Remarque :

- Les verres sont non-cristallins mais certains d'entre eux peuvent cristalliser (Dévitrification).
- Les métaux sont normalement cristallins, il existe toutefois des verres métalliques.



Figures I.5 : (a) Exemple de rubans de verre métallique à base de zirconium, (b) Exemple de tiges de verres métalliques à base de fer.

- Aux trois classes, il convient d'en ajouter une quatrième les matériaux composites, qui sont des « mélanges hétérogènes » de matériaux des trois classes précédentes.
- A ces trois classes, on peut ajouter les semi-conducteurs qui sont des matériaux cristallins à liaisons essentiellement covalentes.

La figure I.6 rappelle les trois classes de matériaux et les trois classes de microstructures correspondantes :

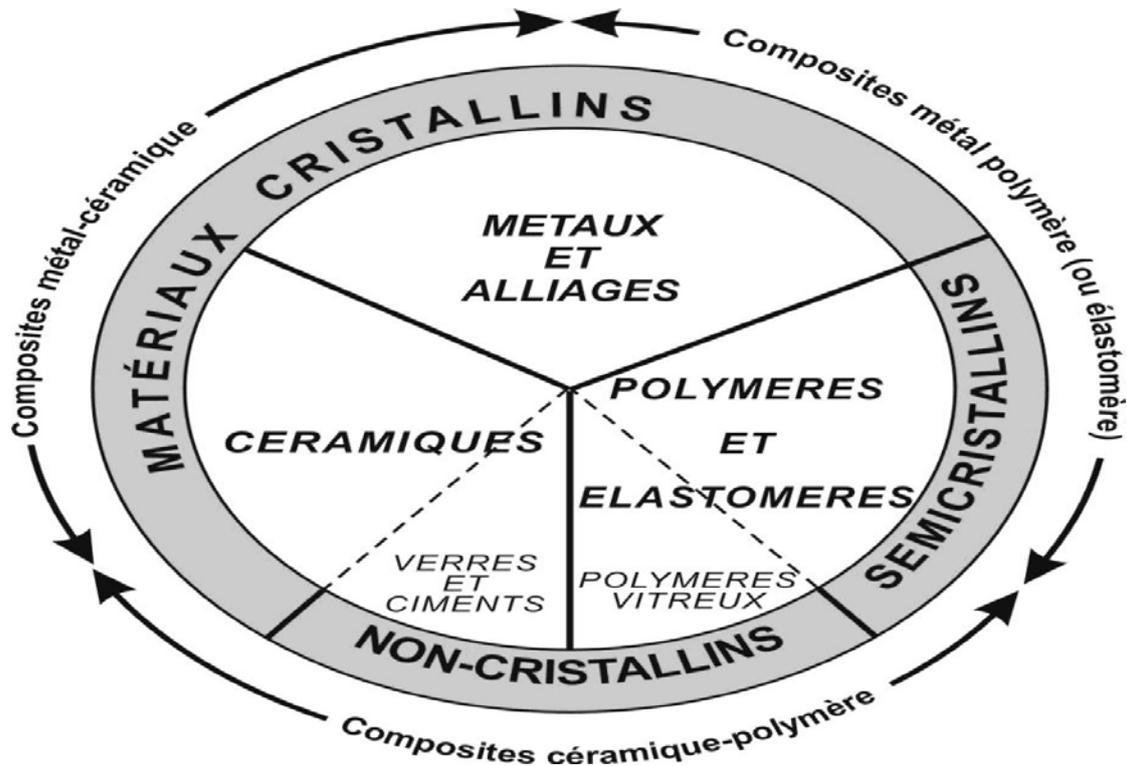


Figure I.6 Au centre on trouve les trois grandes familles : métaux et alliages, polymères et élastomères, verres et céramiques ; ces trois familles ont des propriétés particulières que l'on découvrira dans la suite mais on doit dès maintenant comprendre que ces propriétés sont induites par la microstructure qui peut être cristalline, semi-cristalline 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.

Les différentes classes des matériaux peuvent être regroupées selon l'organigramme suivant :

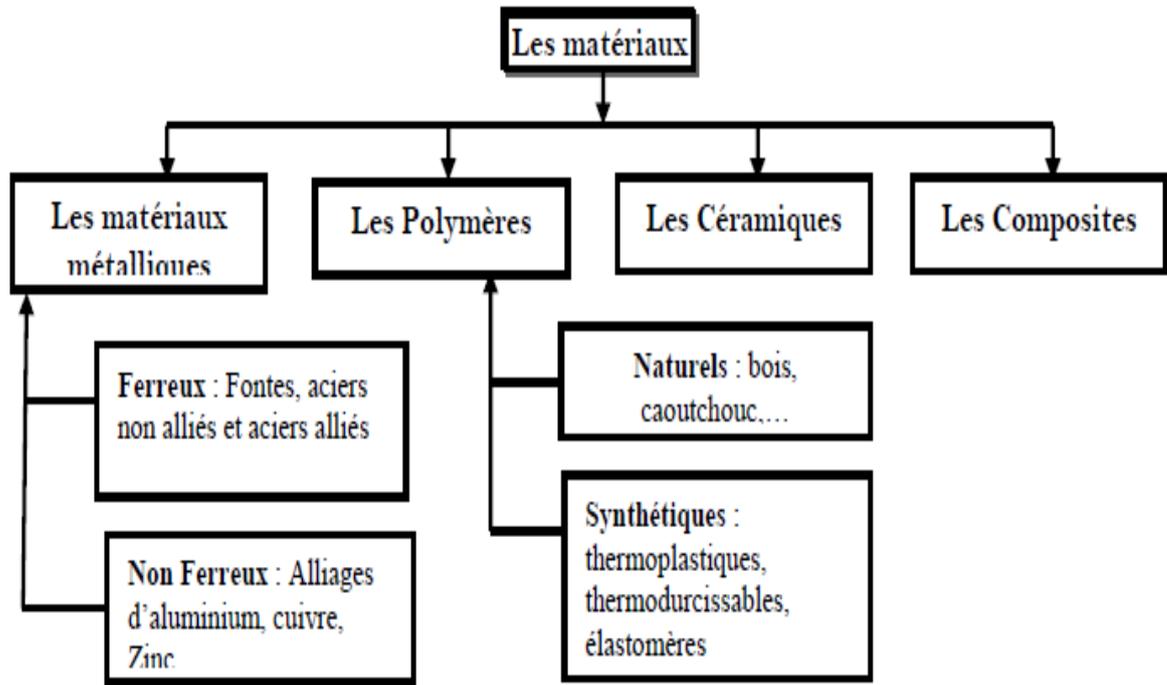


Figure 1.7 : Classification des matériaux

La figure ci-dessous illustre Les différents matériaux qui entrent dans la fabrication d'une voiture.



Figure 1.8 : différents matériaux dans la fabrication d'une voiture.

I.5.2. Classement des matériaux selon leur emploi

On distingue :

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

I.5.2. 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. Ils doivent également résister à toutes les formes de détérioration (vieillessement, 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 (boites 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).

I.5.2.2 - 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 -optique, électrique ou magnétique - chimique ou électrochimique, et intervenant dans un dispositif ou un système.

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.

I.6 PROPRIETES DES MATERIAUX

Les propriétés des matériaux définissent leur comportement en réponse à des actions extérieures et déterminent l'étendue de leurs performances. L'analyse de ces propriétés est l'un des aspects fondamentaux de la science des matériaux. Elles sont exploitées tant dans l'utilisation de l'objet final que dans le processus de fabrication et orientent, pour une large part, les choix des concepteurs. La plupart des propriétés physiques, mécaniques, chimiques, métallurgiques ou de mise en forme sont dites «intrinsèques», car directement liées à la composition atomique et à la structure interne du matériau. Quantitatives, elles sont mesurées par des essais normalisés et interviennent dans des

méthodes de calcul propres à chaque discipline. Ces évaluations permettent de déterminer avec précision, et dans le cadre d'utilisations prédéfinies, le comportement de toute réalisation fonctionnelle ultérieure. D'autres propriétés, à caractère essentiellement qualitatif, s'expriment en termes d'aptitude ou de facilité à remplir une fonction donnée.

1.6.1 Les principales propriétés des matériaux

La masse volumique : est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau pour une unité de volume donnée (le litre ou le mètre cube), elle s'exprime en **g par litre** ou **g par mètre cube**.

Par exemple : La masse volumique de l'aluminium est d'environ 2,7 kg par litre. Cela veut dire que pour un volume de 1 litre d'aluminium sa masse est de 2,7 kg.

La masse volumique est différente selon le matériau. Plus la masse volumique est importante plus le matériau est lourd.

Oxydabilité : c'est la capacité d'un matériau à se combiner avec l'oxygène de l'air qui le rend oxydable et réduit son efficacité de résistance.

Comme le fer sous l'effet de l'humidité se rouille avec le temps.

Dureté : propriété d'un matériau de résister à la pénétration d'un autre matériau.

Exemple le diamant est le matériau qui possède la plus grande dureté.

Ductilité : propriété d'un matériau de s'étirer sans se rompre. La ductilité facilite la mise en forme des matériaux à l'état solide. Exemple le cuivre, qui peut être étiré, est utilisé dans la fabrication de fils électriques.

Résistance : la résistance caractérise la contrainte maximale qu'un matériau peut supporter avant de se rompre. La résistance d'un matériau est fonction, bien entendu, de l'intensité de ses liaisons atomiques ou moléculaires, mais elle dépend également de l'influence de certains paramètres extérieurs, comme la forme des pièces ou les défauts qui y sont présents (fissures et dislocations).

Ténacité : c'est la résistance qu'un matériau oppose à la propagation brutale des fissures. On la caractérise par l'énergie nécessaire pour entraîner la fissure.

Fragilité : propriété d'un matériau de se briser plutôt que de se déformer. Un verre en porcelaine se brise plutôt que de se déformer.

Malléabilité : propriété d'un matériau de s'aplatir ou de se courber sans se rompre. L'aluminium est un matériau malléable que l'on peut aplatir en feuilles.

Résilience : propriété d'un matériau de résister aux chocs sans se rompre. Exemple un casque de moto est conçu pour résister aux chocs.

Rigidité : propriété d'un matériau de garder sa forme, même lorsqu'il est soumis à diverses contraintes. La rigidité est fonction de l'intensité des liaisons qui existent entre les atomes ou les molécules constitutives d'un matériau. On mesure la rigidité par la valeur des divers modules d'élasticités, en particulier le module d'Young E.

Résistance à la corrosion : propriété d'un matériau de résister à l'action de substances corrosives qui peuvent provoquer, entre autre, la formation de rouille.

Conductibilité électrique (ou conductivité électrique): propriété d'un matériau de transmettre le courant électrique.

Conductibilité thermique : propriété d'un matériau de transmettre la chaleur.

Coefficient de dilatation thermique : propriété d'un matériau dont le volume varie en fonction d'un changement de température. Exemple le liquide à l'intérieur d'un thermomètre se dilate sous l'effet de la chaleur.

Élasticité : propriété d'un matériau de se déformer puis de reprendre sa forme initiale par la suite après avoir subi une déformation. Le pneu d'une voiture se déforme sous le poids de celle-ci.

Plasticité : propriété d'un matériau à se déformer sous l'effet d'une charge et à conserver exactement sa forme déformée lorsque l'on relâche la charge.

Viscoélasticité : phénomène qui fait qu'après application ou relâchement d'une contrainte, la déformation totale se produit progressivement. La déformation est suffisamment faible pour que le matériau retrouve ses dimensions initiales après la disparition de la contrainte. Ce comportement peut se manifester à haute vitesse dans certains matériaux cristallins. Pour ces derniers, la déformation élastique

s'accompagne en outre d'un frottement, le frottement intérieur. Mais ce comportement est surtout caractéristiques des polymères et des élastomères, dans lesquels le déploiement et l'alignement élastiques des chaînes se produisent de façon visqueuse.

Viscoplasticité : phénomène qui fait qu'après application instantanée d'une contrainte supérieure à celle de la limite d'élasticité du matériau, il se produit une déformation progressive, dont une partie persiste après relâchement de la contrainte. La viscoplasticité se manifeste dans les matières plastiques et dans le fluage.

Fluage : phénomène qui fait qu'en appliquant une contrainte constante à un matériau, on observe une déformation qui s'accroît avec le temps, sans se stabiliser. Il se manifeste pour les métaux et alliages métalliques, lorsque la température est supérieure à environ 50% T_f (T_f : température de fusion en Kelvin). Il se manifeste pour les matières plastiques au voisinage de la température ambiante.

Le tableau 1 donne une indication des principales propriétés usuelles des polymères, des céramiques et des alliages métalliques.

Famille de matériaux	Métaux	Polymères et élastomères	Céramiques et verres
Densité	élevée	faible	faible
Rigidité (module d'Young)	élevée	faible	élevée
Coefficient de dilatation thermique	moyen	élevé	faible
Dureté	élevée	faible à élevée (fibres)	élevée
Ductilité (déformation à la rupture)	élevée (plasticité)	élevée sauf à l'état vitreux	faible et aléatoire
Conductivité électrique, thermique	élevée	faible (isolants)	électrique : faible thermique : élevée
Résistance à corrosion	faible	en général élevée	élevée
Température max. d'utilisation	élevée	faible (toujours < 200°C)	très élevée
Mise en forme	facile	très facile (moulage)	difficile (frittage)