

## Chapitre 1

### INTRODUCTION A LA SCIENCE DES MATERIAUX

#### OBJECTIFS DU COURS

- Connaitre les diverses classes de matériaux et leurs propriétés.
- Décrire la microstructure des matériaux et leur comportement.
- Définir la science des matériaux.
- Analyser le cycle des matériaux et définir la notion de ressource.

Les *matériaux* ont de tout temps défini le niveau de développement de notre civilisation. Les premiers pas de l'humanité ont ainsi été marqués par l'Age de la Pierre, du Bronze et du Fer. Aujourd'hui, ils jouent un rôle déterminant dans toutes les *mutations technologiques*. Quelle que soit sa spécialité, l'ingénieur ne peut ni concevoir, ni construire de nouveaux objets sans tenir compte des propriétés des matériaux qu'il utilise. C'est en général le comportement des matériaux qui limite les performances des machines et des équipements.

*Les propriétés des matériaux sont définies par la nature des liaisons chimiques, l'arrangement atomique et la microstructure.* L'étude des relations entre l'organisation à l'échelle atomique, la microstructure et les propriétés des matériaux, constitue le domaine de la **Science des Matériaux**. En plus de leur comportement l'utilisation des matériaux dépend également de leur disponibilité, de leur coût, de leurs méthodes de synthèse et de fabrication. L'emploi des matériaux est aussi conditionné par les méthodes de transformation, leur facilité de mise en forme et leur compatibilité avec l'environnement.

## COMMENT DEFINIR UN MATERIAU ?

La matière dont est formé le monde qui nous entoure est composée de particules discrètes, ayant une taille submicroscopique, dont les lois de comportement sont décrites par les théories atomiques. Les états d'organisation de la matière sont très variés depuis le désordre complet des atomes ou des molécules d'un gaz sous faible pression jusqu'à l'ordre quasi parfait des atomes dans un monocristal.

Dans ce cours nous définissons les matériaux comme les solides utilisés par l'homme pour la fabrication d'objets qui constituent le support de son cadre de vie.

En effet, aucun objet ne peut être réalisé sans matériaux. Tous les secteurs de l'activité humaine dépendent des matériaux, de la fabrication d'un circuit intégré à l'édification d'un barrage hydroélectrique. Les matériaux sont aussi indispensables à notre société que la nourriture, l'énergie et l'information. On a trop souvent tendance à oublier leur rôle essentiel.

La définition reprise dans ce cours est limitée aux matériaux solides. Elle exclut les liquides et les gaz.

## COMPLEMENTARITE DES MATERIAUX

Les matériaux sont communément classés en fonction de leurs propriétés les plus typiques: matériaux à haute résistance mécanique, conducteurs électriques, aimants permanents, etc. Pour mettre en évidence les multiples fonctions que remplissent les matériaux, nous allons examiner dans le paragraphe suivant la composition des différents éléments d'une ligne électrique à haute tension.

Le câble porteur du courant électrique doit être bon conducteur d'électricité pour minimiser les pertes. Pour augmenter la capacité des câbles porteurs, on utilise une tension électrique qui est très élevée. Pour des raisons d'économie on suspend les câbles à des pylônes en utilisant l'air comme isolant. Pour limiter le nombre de pylônes, le câble doit être léger et très résistant à la rupture. À l'ambiance, les meilleurs conducteurs électriques sont des métaux à l'état très pur: le cuivre et l'aluminium.

Cependant, ces métaux à l'état très pur n'ont pas une résistance mécanique suffisante. Il faut donc utiliser un câble conducteur composé de plusieurs matériaux. L'âme du câble est faite en fils d'acier très résistants aux sollicitations mécaniques mais caractérisés par une conductivité électrique plus faible. Le transport de l'énergie électrique est en majeure partie assuré par des fils d'aluminium pur qui sont plus légers que le cuivre et qui sont disposés autour de l'âme en acier du câble.

Les pylônes sont fabriqués en acier pour résister au poids du câble. L'acier doit être protégé contre la corrosion (rouille) par une peinture, un matériau polymère, ou par un revêtement métallique, tel que le zinc. Des éléments isolants sont nécessaires pour fixer les câbles sur les pylônes métalliques. Cette fonction est remplie par des isolateurs en porcelaine qui est un matériau céramique. Le béton, autre matériau céramique, est utilisé pour l'ancrage des pylônes dans le terrain.

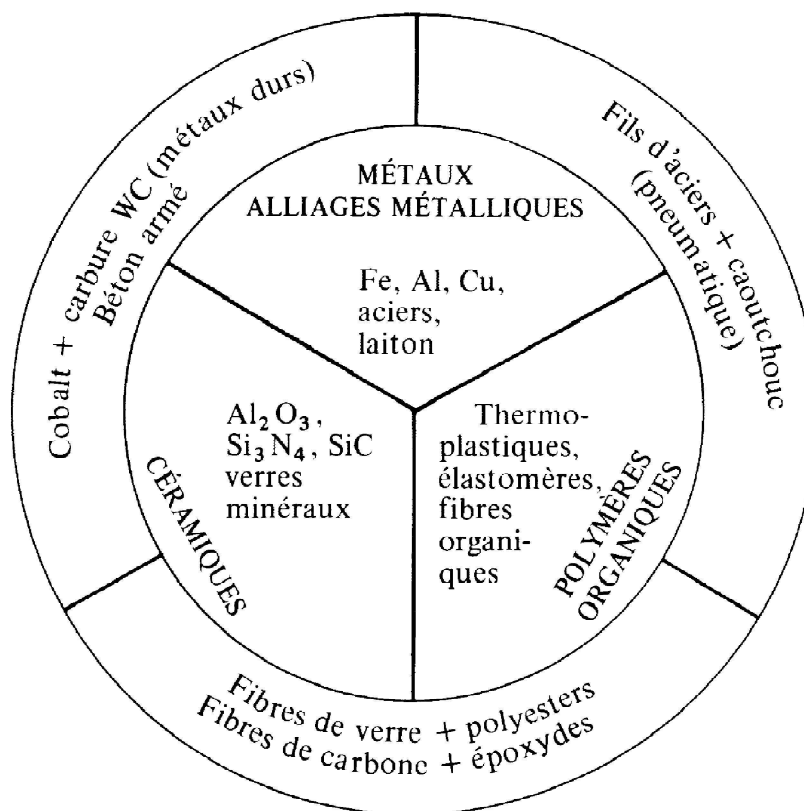
Une demi-douzaine de matériaux est donc nécessaire pour la réalisation d'une ligne à haute tension et leur combinaison appropriée permet d'établir un système fonctionnel. Cet exemple d'une complexité moyenne montre qu'une réalisation technique met en général en jeu un nombre important de matériaux.

## LES TROIS CLASSES DE MATERIAUX

Les matériaux sont classés suivant différents critères comme par exemple :

- leur composition,
- leur structure ou
- leurs propriétés.

Dans ce cours, nous faisons la distinction entre trois grands groupes de matériaux. Cette classification est basée sur la nature des liaisons et sur les structures atomiques:



**FIG. 1.1** Les trois classes de matériaux: métaux, céramiques et polymères organiques avec quelques possibilités de combinaison pour former des matériaux composites.

- les métaux et leurs alliages (liaisons métalliques);
- les polymères organiques (liaisons covalentes et liaisons secondaires);
- les céramiques (liaisons ioniques et liaisons covalentes).

Cette classification peut être examinée à l'aide du Tableau périodique des Éléments (Tableau de Mendeleïev).

La majeure partie des éléments (à gauche et au centre du tableau de Mendeleïev) sont des métaux (environ 70). La partie de droite du Tableau Périodique est occupée par les non- métaux, comme l'oxygène. Dans le domaine intermédiaire entre les métaux et les non-métaux, on trouve un certain nombre d'éléments comme le carbone et le silicium (semi-conducteur) qui échappent à cette classification simple.

A température ambiante, la plupart des métaux sont des solides atomiques. Les métaux les plus utilisés sont le fer, l'aluminium et le cuivre. Les alliages métalliques sont, en général, les combinaisons de deux ou de plusieurs métaux comme dans le cas des laitons (alliages de cuivre et de zinc), mais ils peuvent également contenir des éléments non métalliques. Parmi ce type d'alliage on trouve, par exemple, la plupart des aciers (alliages fer-carbone).

**Les métaux** et leurs alliages sont ordinairement très bons conducteurs de la chaleur et de l'électricité et opaques à la lumière visible qu'ils réfléchissent. Ils sont le plus souvent durs, rigides et déformables plastiquement. Un nombre important de métaux possèdent une température de fusion ( $T_m$ ) élevée.

**Les polymères organiques** sont des matériaux composés de molécules formant en général de longues chaînes d'atomes de carbone sur lesquels sont fixés des éléments comme l'hydrogène ou le chlore, ou des groupements

d'atomes comme le radical méthyle ( $-\text{CH}_3$ ). D'autres éléments comme le soufre, l'azote, le silicium, etc., peuvent également intervenir dans la composition de la chaîne.

Les polymères organiques les plus connus sont :

- le poly (chlorure de vinyle) (PVC),
- le polyéthylène (PE) et
- le polystyrène (PS).

Ils sont souvent connus par leur «marque de fabrique»: poly(méthacrylate de méthyle) (PMMA ou «Plexiglas»), polyamides (PA ou «Nylons»), poly(tétrafluoroéthylène) (PTFE ou «Téflon»).

Les polymères organiques (verres organiques, caoutchoucs, ...) ont des propriétés physiques très diversifiées. Ils sont presque toujours des isolants électriques et thermiques. Ils sont légers et très faciles à mettre en forme. Contrairement aux métaux, les polymères, la plupart du temps, ne supportent pas des températures supérieures à 200 °C.

**Les céramiques** sont des matériaux inorganiques qui, en règle générale, résultent de la combinaison d'un nombre limité d'éléments métalliques (Mg, Al, Ti, ...) avec des éléments non métalliques dont le plus courant est l'oxygène.

Originellement, le terme céramique était réservé aux oxydes (silice  $\text{SiO}_2$ , alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ...). On élargit cette classification en y incluant d'autres combinaisons d'atomes comme le carbure de tungstène (WC) ou le nitrure de silicium ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ).

On connaît surtout les matériaux céramiques par leur caractère réfractaire, c'est à- dire par leurs résistances mécanique et thermique élevées mais l'usage des céramiques est loin de se limiter à ce type d'application.

Les céramiques sont en général des matériaux très durs et elles sont largement utilisées comme abrasifs. La plupart des céramiques sont des isolants électriques et thermiques mais on trouve parmi ces matériaux les meilleurs conducteurs thermiques comme le diamant. Un grand nombre de céramiques ont

également des applications importantes dans les appareillages électriques ainsi que dans l'électronique. Les verres minéraux, qui sont des combinaisons d'oxydes ( $\text{SiO}_2 + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \dots$ ) à structure amorphe, font également partie de la classe des céramiques. Notons que de manière générale les verres et les céramiques sont des matériaux fragiles ce qui réduit leurs emploi pour des applications où les chocs mécaniques et thermiques sont importants.

Les trois types de matériaux peuvent être combinés pour former des **matériaux composites** (fig. 1.1). Un matériau composite est constitué de deux ou de plusieurs matériaux différents qui combinent de manière synergique leurs propriétés spécifiques. C'est le cas des polymères renforcées par les fibres de verre qui forment un composite léger et à haute résistance mécanique. Le béton, agglomérat de ciment et de gravier, représente un autre exemple de matériau composite.

La subdivision des matériaux en trois classes principales, basée surtout sur les caractéristiques atomiques, structurales et sur les propriétés est commode, mais elle présente un certain caractère arbitraire. Ainsi, le diamant, qui peut être considéré comme un polymère tridimensionnel, est un matériau organique puisqu'il est composé d'atomes de carbone. Cependant, sa dureté et ses propriétés mécaniques le rattachent plutôt aux céramiques. De même, la conductivité électrique n'est plus l'apanage des métaux puisque certains oxydes ( $\text{VO}_2$ ,  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ) et quelques polymères organiques conduisent l'électricité.

Toute classification des matériaux possède donc un certain caractère arbitraire: il n'y a pas de solution de continuité entre les trois classes de matériaux. D'autres classifications, basées sur certaines propriétés spécifiques des matériaux comme la semi conductivité, peuvent également se justifier.

## Propriétés des matériaux

Un matériau possède un ensemble de propriétés qui détermine son comportement. On caractérise une propriété d'un matériau en analysant la réaction du matériau à une sollicitation extérieure. On détermine en général une propriété à l'aide d'un essai normalisé. Selon le type de sollicitations extérieures, on distingue trois catégories de propriétés:

- ***Les propriétés mécaniques*** qui reflètent le comportement des matériaux déformés par un ensemble de forces.
- ***Les propriétés physiques*** qui mesurent le comportement des matériaux soumis à l'action de la température, des champs électriques ou magnétiques ou de la lumière.
- ***Les propriétés chimiques*** qui caractérisent le comportement des matériaux dans un environnement réactif.

La réalisation des objets et des structures conçus par l'ingénieur est fréquemment limitée par les propriétés des matériaux disponibles. Tout progrès technologique important est souvent lié au développement de matériaux dotés de propriétés améliorées ou nouvelles. Ainsi, on sait qu'il est possible d'augmenter de manière substantielle le rendement énergétique des turbines à gaz (réacteurs d'avion) en travaillant à température plus élevée. La mise au point de moteurs plus performants est cependant conditionnée par la mise au point d'alliages métalliques plus résistants au fluage ou de céramiques ayant une meilleure tenue au choc thermique. Certaines propriétés dérivent directement de l'arrangement des atomes et de la nature des liaisons. C'est le cas de l'opacité des métaux, de la transparence des verres ou de l'extensibilité des caoutchoucs. D'autres propriétés des matériaux sont fortement dépendantes de leur microstructure qui est composée de grains ou de particules de taille microscopique, dotés d'une morphologie déterminée.



## Utilisation des matériaux

Il est primordial de choisir les matériaux les mieux adaptés aux applications envisagées. Les critères de choix doivent prendre en compte les facteurs suivants:

- les fonctions principales des objets et des structures dont la réalisation est envisagée; il est par exemple nécessaire de déterminer les modes de mise en charge, les températures ainsi que les conditions générales d'utilisation;
- le comportement intrinsèque des matériaux: résistance à la rupture, à l'usure, à la corrosion, conductibilité, etc.;
- le comportement des matériaux durant leur fabrication et leur transformation;
- le comportement des matériaux vis-à-vis de l'environnement;
- le prix de revient des diverses solutions envisageables;
- les possibilités de recyclage ou d'élimination par incinération avec récupération d'énergie.

Dans le développement d'une technologie, il est fréquent de substituer un matériau à un autre, soit pour des raisons de performance, soit pour des motifs économiques ou écologiques. Prenons l'exemple des carrosseries de voiture. Initialement, ces carrosseries étaient construites en bois. Progressivement, le bois a été remplacé par le métal, ce dernier étant à son tour partiellement supplanté par des polymères organiques. Si le métal a été substitué au bois, c'est avant tout parce qu'il se prête mieux au formage et qu'il possède des propriétés contrôlables et moins sensibles à l'humidité ce qui facilite la fabrication d'objets en grande série et qui augmente la fiabilité.

On tend également à alléger les structures et les objets en mouvement pour réaliser des économies énergétiques. C'est pour ce motif que l'on a introduit dans la construction automobile des matériaux polymères qui ont une masse volumique  $\rho$  voisine de  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$  (ou  $\text{t m}^{-3}$ ) alors que celle de la tôle d'acier, constituant actuellement la majeure partie des carrosseries, est voisine

de  $8 \text{ g cm}^{-3}$ . On allège également les carrosseries en utilisant des tôles d'acier plus minces à haute résistance produites par une meilleure connaissance des mécanismes de durcissement (aciers à grains fins) ou par l'emploi de tôle d'aluminium. Cependant, les matériaux plus légers ont des propriétés mécaniques moins élevées que celles des matériaux traditionnels comme les aciers. Pour des applications qui font intervenir des contraintes mécaniques en traction, il faut prendre en considération le rapport  $E/\rho$  pour choisir le type de matériaux à utiliser. La valeur de ce rapport est pratiquement équivalente pour les aciers et pour l'aluminium. Par contre, pour les polymères thermoplastiques ce rapport  $E/\rho$  est environ 10 fois plus petit. Ce simple calcul nous montre que, malgré leur faible densité, l'emploi des polymères ne peut être utilisé lorsque les contraintes mécaniques sont importantes.

L'utilisation des matériaux fait intervenir d'autres critères de choix (résistance à la corrosion, apparence...) que celui de la résistance mécanique. Dès lors, les matériaux polymères organiques se développent à un rythme accéléré d'autant plus que grâce à l'introduction de fibres à haut module (carbone, verre, etc.) on obtient des propriétés mécaniques supérieures à celles des matériaux ferreux tout en gardant une masse spécifique inférieure à  $2 \text{ g cm}^{-3}$  ou  $2 \text{ t m}^{-3}$ ). Ces matériaux appelés matériaux composites s'introduisent progressivement dans divers marchés porteurs (aviation, construction automobile, articles de sport). Le développement des composites reste freiné par leur coût de production et de fabrication plus élevé que celui des matériaux classiques. Il pose également de sérieux problèmes de recyclage. La fabrication des verres de montre a subi elle aussi, au fil des ans, une évolution considérable. On a d'abord remplacé le verre minéral fragile par un verre organique (polymère) résistant à l'impact mais rayable. Actuellement, on utilise également comme verre de montre une plaquette de monocristal de saphir synthétique qui est un matériau céramique qui associe transparence, résistance au choc et résistance au rayage.

Ces exemples montrent que les matériaux sont en développement constant. Un matériau mis au point pour une application spécifique a souvent des retombées dans d'autres domaines de la technologie. Ce développement croissant des matériaux associé à une meilleure interprétation théorique de leur comportement a abouti, dans les années 50, à la naissance de la science des matériaux. Celle-ci est étroitement associée à la notion de microstructure.

## Microstructure

Actuellement, les aubes des turbines à gaz conservent des propriétés mécaniques élevées et résistent à l'oxydation jusqu'à une température légèrement supérieure à 1000 °C. Celles-ci sont fabriquées en alliages métalliques à base de nickel contenant une dizaine d'éléments dont l'aluminium, le titane et le chrome. La résistance de ces alliages aux sollicitations mécaniques à température élevée résulte essentiellement de leur microstructure.

Comme nous l'avons déjà mentionné la microstructure décrit l'ensemble des grains ou des particules de taille microscopique, qui caractérise la structure d'un grand nombre de matériaux. La microstructure d'un matériau est donc formée par l'ensemble des grains, des particules ou des défauts observables par microscopie (optique et électronique). Pour comprendre le comportement des matériaux, il faut établir la liaison entre des phénomènes qui se déroulent à l'échelle microscopique et submicroscopique et les propriétés du matériau. Cette liaison met en relation des phénomènes qui se déroulent à des échelles faisant intervenir neuf ordres de grandeur du nanomètre ( $10^{-9}$  m) au mètre. Plusieurs étapes de grossissement sont donc nécessaires, pour passer de l'échelle de l'aube d'une turbine à gaz à l'observation de la microstructure et à la détermination de l'arrangement des atomes. Ces analyses mettent successivement en jeu le microscope optique (observation du mm au  $\mu$ m), le microscope électronique (observation de 100  $\mu$ m au nm) et la diffraction des rayons X pour l'analyse de l'arrangement à l'échelle atomique (observation à l'échelle du nm). Les

éléments de la microstructure d'un matériau sont en général définis par plusieurs paramètres:

- composition;
- arrangement atomique;
- quantité relative;
- morphologie;
- taille.

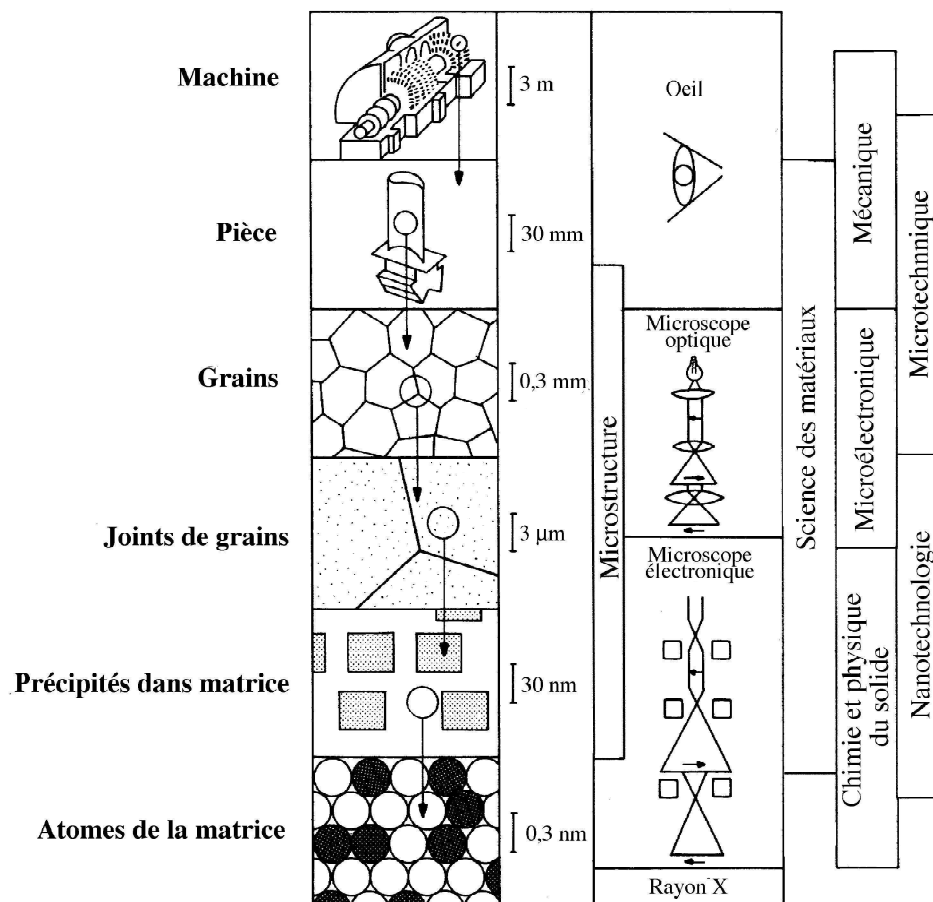


FIG. 1.3 Rapport de grandeur entre les structures et les microstructures en relation avec quelques grands domaines de la science et de la technologie.

La microstructure détermine les propriétés d'un très grand nombre de matériaux. C'est grâce à la modification contrôlée de la microstructure lors de la fabrication ou de la transformation que l'ingénieur en matériaux obtient une large gamme de propriétés. Une variation de la microstructure au cours du temps lors de l'utilisation du matériau entraîne une modification importante de ses

propriétés (phénomène de vieillissement). Pour obtenir des matériaux fiables, il est indispensable de maîtriser les phénomènes de vieillissement qui sont le résultat de modifications physiques ou de réactions chimiques.

## Science des matériaux

Les sollicitations auxquelles sont soumis les matériaux sont complexes et multiples. Leur comportement pour une utilisation déterminée est représenté par un ensemble de propriétés. On parle également du comportement des matériaux pendant leur fabrication ou leur mise en forme. (par exemple, la coulabilité, la déformabilité...).

Le concept de la science des matériaux est né de la nécessité d'acquérir la maîtrise du comportement des matériaux par la connaissance des lois fondamentales qui déterminent leurs propriétés. La science des matériaux a pour objectif d'établir les relations existant entre la composition et l'organisation atomique ou moléculaire, la microstructure et les propriétés macroscopiques des matériaux. Cette science est une connaissance fondamentale des matériaux n'était pas nécessaire lorsque l'homme se contentait de l'argile, du bois et de la laine... pour satisfaire la plupart de ses besoins. L'approche empirique et l'expérience accumulée par les métallurgistes et les céramistes depuis des milliers d'années ne sont plus suffisantes pour satisfaire aux besoins contemporains et s'adapter aux exigences complexes de la technologie moderne.

Une approche unifiée, quantitative et fondamentale de la description du comportement des matériaux de l'ingénieur est devenue indispensable.

La science des matériaux a un caractère général et une approche multidisciplinaire qui fait appel aux connaissances du chimiste et du physicien du côté des sciences de base, et à celles de l'ingénieur (mécanicien, électricien, du génie civil) du côté des applications et des procédés de fabrication. La science des matériaux émerge comme un ensemble cohérent. Elle est couplée au génie des matériaux qui a pour objectif la réalisation de matériaux aux propriétés

déterminées. La science des matériaux traite l'ensemble des matériaux, métaux, céramiques, polymères, composites de manière unifiée avec les mêmes concepts théoriques et les mêmes outils expérimentaux. Comme le schématise la figure 1.4, la science et le génie des matériaux comportent quatre pôles principaux: synthèse, fabrication et transformation, composition et structure, propriétés et performances. Les différents comportements (à la fabrication comme à l'utilisation) ainsi que les facteurs économiques qui y sont associés caractérisent la performance d'un matériau.

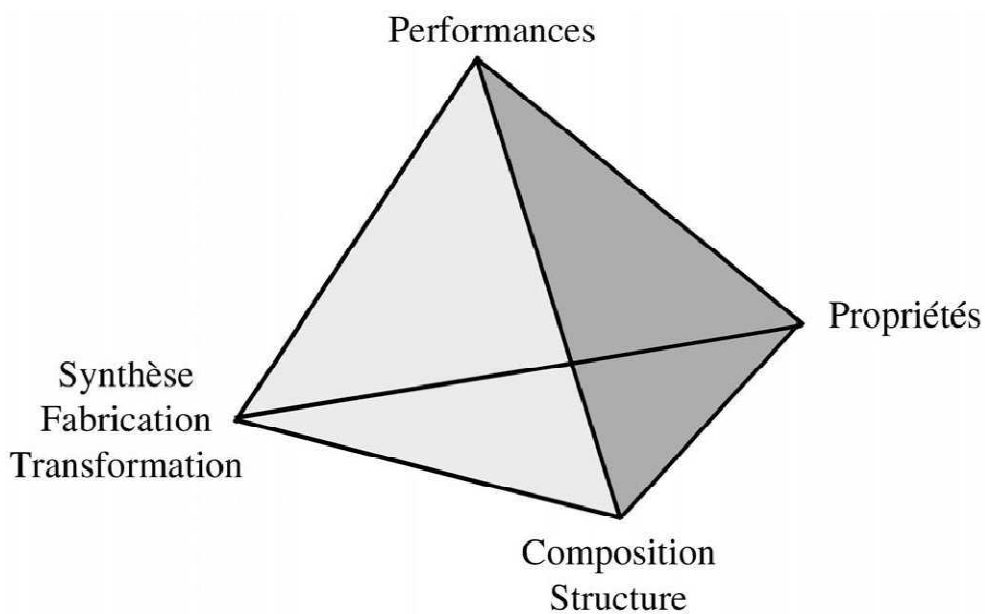


FIG. 1.4 Les quatre pôles de base de la science et du génie des matériaux.

Les quatre pôles de la science des matériaux sont étroitement associés. Le matériau est élaboré au cours de sa synthèse (polymère) ou de sa fabrication (métaux, alliages, céramiques, etc.). La transformation a comme objectif de mettre en forme le matériau élaboré et d'en préparer un objet fini caractérisé par son comportement. La transformation se fait, en règle générale, en plusieurs étapes. Par exemple, la préparation d'une pièce de carrosserie fait intervenir successivement le laminage de la tôle à partir du lingot d'acier, l'emboutissage de la tôle pour former la pièce et une série d'opérations annexes de finissage (peinture, etc.). Pour atteindre des propriétés optimales, il est indispensable de

maîtriser la structure et la composition du matériau et il faut par conséquent posséder une série de techniques d'analyse très sophistiquées.

Ce sont les contributions multiples de la science et du génie des matériaux qui ont complètement remodelé le monde qui nous entoure en libérant l'homme d'un grand nombre de contraintes liées à notre environnement. Notre mode de vie s'est radicalement transformé en quelques décennies en majeure partie grâce à l'apport de la science et du génie des matériaux qui ont permis la création des outils de la vie moderne: voitures, avions, ponts, téléphériques, ordinateurs, équipements de télécommunications, satellites, substituts biomédicales...

### **CYCLE DES MATÉRIAUX : Recyclage**

La capacité de production des matériaux est étroitement liée aux ressources naturelles et aux possibilités de recyclage des déchets. Après extraction, la matière première subit des transformations physiques et chimiques diverses qui aboutissent à l'obtention des matériaux. L'accumulation des équipements et des biens de consommation s'accompagne d'un surplus localisé de matériaux usagés. Ceci pose le problème de la récupération (recyclage) des matériaux. La figure 1.5 décrit le cycle des matériaux, avec ses multiples phases de transformations successives, qui vont de l'exploitation des ressources à la formation des déchets. Une gestion optimale de ce cycle reste très difficile à réaliser en pratique. Cependant, sa maîtrise devient à la longue de plus en plus importante pour la sauvegarde de l'environnement.

Le recyclage est habituellement très aisé pour les métaux. Pour d'autres matériaux, comme les polymères organiques, cette récupération reste difficile en raison de leur structure chimique complexe qui rend difficile la séparation des constituants de ces matériaux et ne permet pas la formation d'alliage. Pour des raisons écologiques et sous la pression des pouvoirs publics, on imagine actuellement divers procédés de recyclage des polymères. Ceux-ci ne produisent généralement que des matériaux de faible performance et ces procédés restent

très difficiles à valoriser. Ce n'est qu'en standardisant les polymères utilisés qu'on arrivera à mettre au point des méthodes de recyclage des polymères efficaces.

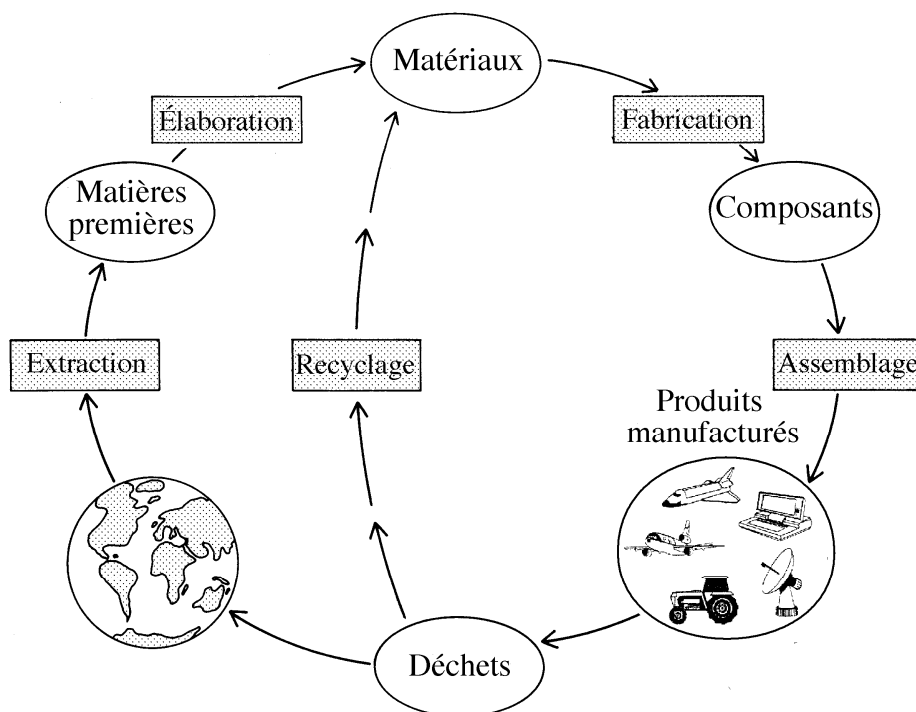


FIG. 1.5 Cycle des matériaux

Un exemple actuellement en cours de développement est celui des polymères intervenant dans l'automobile qui sont non seulement sélectionnés pour leurs performances mais aussi en fonction de leur recyclabilité en raison des tonnages importants utilisés. Ceci amène entre autres une limitation du nombre de polymères utilisés dans un véhicule. Notons que pour les polymères courants comme ceux intervenant dans l'emballage, il est actuellement plus économique de les incinérer pour en récupérer l'énergie. Ce qui ne va pas sans poser des problèmes au niveau écologique.

Par contre, le recyclage des verres minéraux (céramiques), du papier (cellulose + lignine) et des polymères organiques, qui est pris en main par les pouvoirs publics de la majorité des pays européens et nord-américains, est complètement entré dans les mœurs.



## Ressources et réserves

Les ressources d'un élément sont constituées par la quantité de cet élément disponible dans l'écorce terrestre, les océans et l'atmosphère, et qui pourrait être extraite dans le futur. Toutes les ressources ne sont donc pas utilisables dans le présent.

Pour calculer les ressources de la terre en éléments, on ne tient compte de leur concentration moyenne dans l'écorce terrestre continentale que jusqu'à une profondeur relativement faible (1 km par exemple). Cette portion limitée de l'écorce terrestre correspond à une masse totale d'environ  $10^{18}$  tonnes. La concentration moyenne des éléments dans l'écorce terrestre est généralement beaucoup trop faible pour que la production de la plupart des métaux soit rentable. Seuls les gisements, c'est-à-dire les zones où la concentration d'un minéral est importante et qui résultent de processus géologiques d'enrichissement, valent la peine d'être exploités.

TABLEAU 1.6 : Répartition moyenne des principaux éléments dans l'écorce terrestre,

Écorce continentale (1 km) Masse $\approx 10^{18}$ tonnes (% poids)		Océans Masse $\approx 10^{17}$ tonnes (% poids)		Atmosphère Masse $\approx 10^{16}$ tonnes (% poids)	
O	47	O	85	N	79
Si	27	H	10	O	19
Al	8	Cl	2	Ar	2
Fe	5	Na	1		
Ca	4				
Na	3				
K	3				
Mg	2				
Ti	0,4				

La fraction des ressources qui est actuellement susceptible d'une exploitation économique est appelée réserve. Les réserves sont donc beaucoup

moins importantes que les ressources. La limite entre les deux est conditionnée par l'ensemble des facteurs économiques et technologiques liés à leur exploitation. Elles varient donc au cours du temps et dépendent également de la stratégie économique des divers états et des grands groupes industriels. Neuf éléments constituent 99,4 % de la masse de l'écorce terrestre (tab. 1.6). On trouve parmi ceux-ci deux métaux importants: le fer et l'aluminium qui sont actuellement produits à grande échelle. La concentration moyenne des autres métaux présents dans l'écorce terrestre et qui ne figurent pas dans le tableau 1.6 est inférieure à 0,01%, soit 100 g/t. C'est le cas du cuivre qui est cependant produit à un tonnage voisin de l'aluminium. L'écorce terrestre est composée à environ 96% de son volume d'oxydes qui constituent des ressources inépuisables pour la fabrication des céramiques. Les polymères organiques sont élaborés à partir du charbon et des hydrocarbures qui constituent également des ressources présentes en très grande quantité.

L'extraction des ressources et la fabrication des matériaux exigent de très grosses quantités d'énergie. Le prix des matériaux est donc fortement dépendant du prix de l'énergie. D'un point de vue énergétique, les matériaux organiques sont particulièrement favorisés, car l'énergie nécessaire à leur synthèse (y compris leur contenu énergétique intrinsèque) et à leur transformation est beaucoup plus faible que celle utilisée pour la fabrication et la mise en oeuvre des métaux ou des céramiques. Certains métaux, l'aluminium en particulier, sont de très gros consommateurs d'énergie. Ils voient donc leur croissance freinée au profit des matériaux organiques pour des motifs liés, entre autres, au coût de l'énergie.

La figure 1.7 donne une estimation du coût des principaux matériaux tandis que la figure 1.8 indique le coût de production par unité de poids des divers objets manufacturés. Les matériaux de construction comme le béton, qui sont les moins chers, sont les plus employés. Les matériaux métalliques sont employés dans pratiquement tous les domaines d'activité manufacturière en

particulier dans l'automobile parce qu'ils présentent une meilleure combinaison des propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la rupture, déformabilité, ténacité). Les polymères thermoplastiques qui sont particulièrement adaptés à une production de masse, sont largement utilisés dans l'électroménager. Les élastomères (caoutchoucs) constituent une autre catégorie importante de matériaux polymères (pneumatiques, joints, tuyaux flexibles, supports élastiques, etc.).

Les verres minéraux, qui sont des matériaux céramiques peu coûteux, sont largement utilisés à raison de leur transparence. Les céramiques techniques (zircone ( $ZrO_2$ ), nitrure et carbure de silicium,...), dont le coût est beaucoup plus élevé, sont réservées à des applications techniques à très haute température (1900 -2300 °C). Une application importante des composites à base de fibres de verre se situe dans le domaine des constructions navales (bateaux de plaisance) tandis que l'utilisation des composites à base de fibres carbonées beaucoup plus coûteuses se limite surtout à l'aviation civile (empennage), militaire et à l'aérospatiale. Les matériaux spéciaux comme les métaux nobles (or, platine, etc.), le diamant et les métaux durs (cermet) sont généralement réservés à des applications de haute technologie.

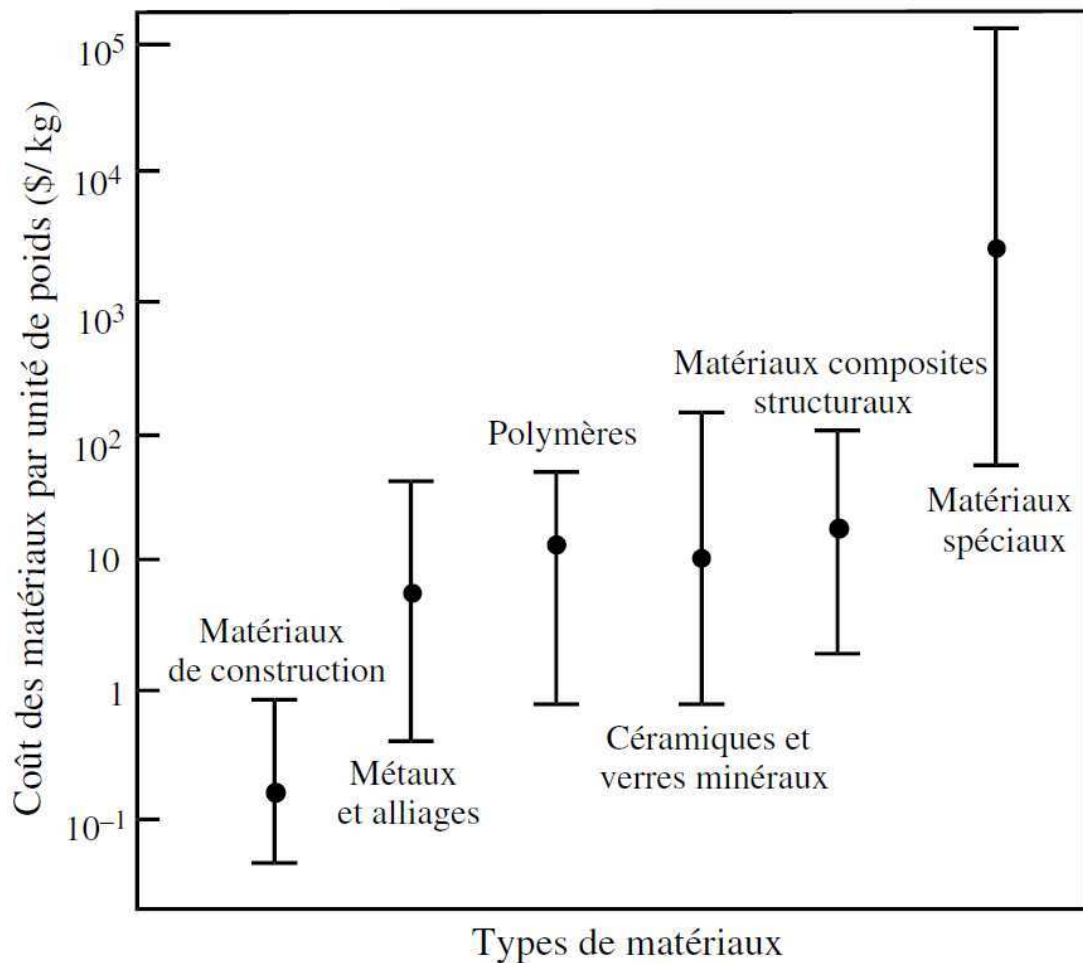


FIG. 1.7 Variation du coût de divers types de matériaux par unité pondérale (d'après Ashby, 1992).

La fabrication d'objets ne demandant que de très petites quantités de matière peut se faire de manière économiquement valable avec des matériaux plus coûteux tandis que la construction de produits manufacturés de poids plus important doit nécessairement faire intervenir des matériaux moins onéreux pour être rentable. C'est ce qui explique (fig. 1.8) qu'un objet aussi commun qu'une brosse à dent à un coût pondéral plus élevé que celui d'une Rolls Royce.

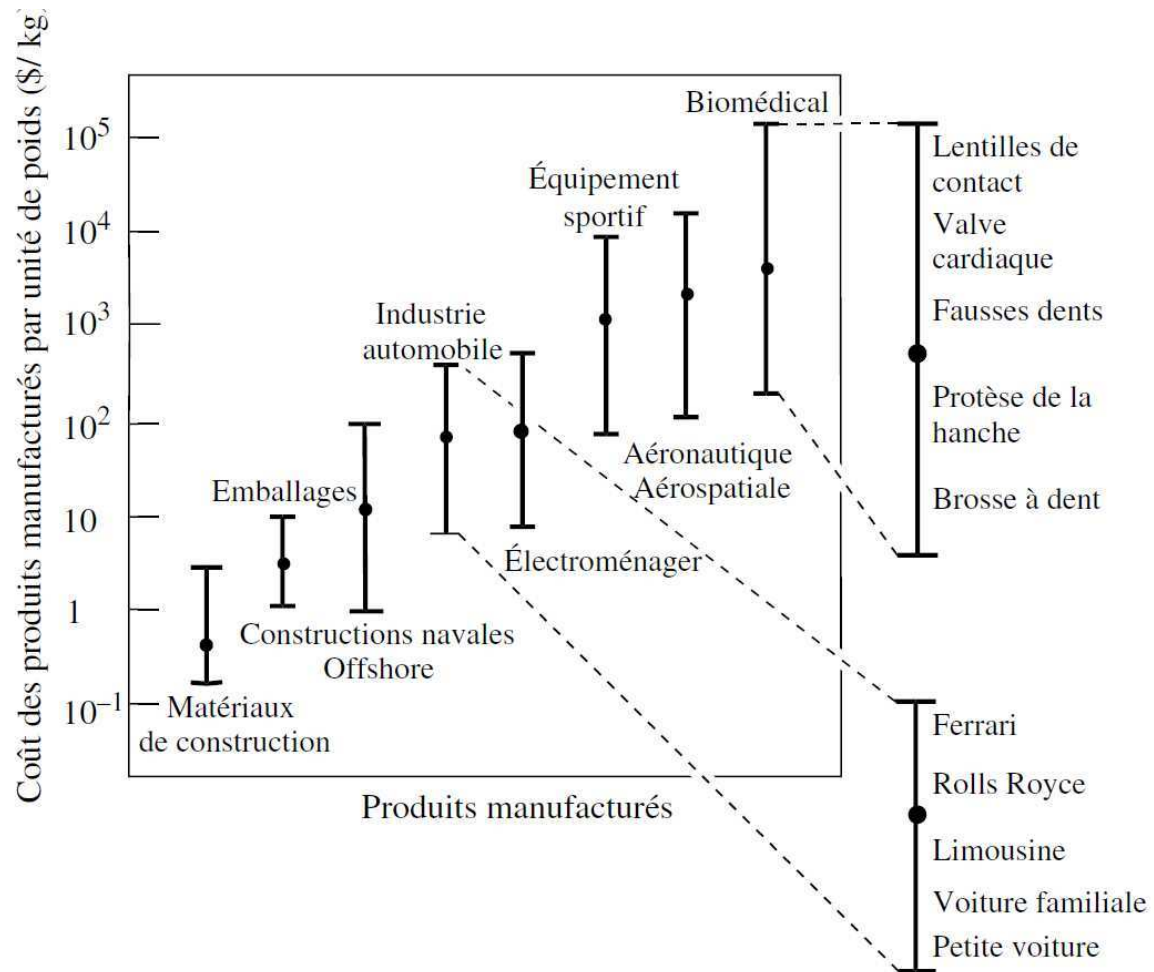


FIG. 1.8 Coût des produits manufacturés par unité pondérale. En encart, le coût des matériaux de l'automobile et du biomédical (d'après Ashby, 1992).

## RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Les matériaux jouent un rôle essentiel dans notre société. Tout progrès technologique important est conditionné par l'amélioration des propriétés des matériaux existants, par l'apparition de matériaux nouveaux ou de procédés de fabrication plus performants et moins coûteux.

Les matériaux peuvent être classés en trois catégories: les métaux, les polymères organiques et les céramiques. Chaque catégorie de matériaux possède un ensemble de propriétés spécifiques qui caractérisent leur réponse à l'action des sollicitations extérieures. Il faut souligner que certaines propriétés sont communes à plusieurs classes de matériaux et qu'il est fréquent, pour des motifs économiques ou techniques, de substituer un matériau à un autre pour une application déterminée.

Les propriétés d'un grand nombre de matériaux sont conditionnées par leur microstructure. Celle-ci dépend de la composition et de l'organisation atomique ou moléculaire, mais également des traitements physiques et chimiques qu'a subi le matériau durant sa fabrication et sa mise en forme. D'autre part, toute évolution de la microstructure intervenant en cours de service entraîne aussi une modification des propriétés.

La science des matériaux peut être considérée comme une approche unifiée et fondamentale de la description du comportement de l'ensemble des matériaux. Cette science, encore très jeune, reste actuellement en pleine évolution. Un des objectifs de la science des matériaux est de connaître la variation des propriétés en fonction des modifications de leur microstructure et de mettre en évidence les phénomènes responsables de ces modifications.

Une étude sommaire du cycle des matériaux permet de montrer l'importance des ressources et des réserves qui, avec le coût de l'énergie nécessaire à l'extraction, à la transformation et au recyclage des matières premières en matériaux, déterminent leur prix de revient.