
Domaine ST

Spécialité :

Semestre :

Intitule :

Chargé du module :

Filière : Métallurgie

Licence académique en Métallurgie

II / Année 2019- 2020

Propriétés des Matériaux

Pr. BACCOUCHE Mostefa

Minéraux industriels

Le terme « minéral industriel » désigne généralement les roches ou les minéraux dont les propriétés physiques ou chimiques sont mises à contribution dans divers usages, produits ou procédés industriels.



Les minéraux industriels comprennent plus d'une cinquantaine de roches, substances et minéraux non métalliques pour la plupart, dont plus d'une trentaine ont été répertoriés au Québec. Les minéraux industriels se trouvent en concentrations variables dans divers types de roches.

Sont inclus dans les minéraux industriels :

- les pierres industrielles (calcaire, dolomie, marbre, silice)
- la plupart des minéraux non métalliques ;
- certains minéraux métalliques (chromite, ilménite, magnétite, hématite) utilisés sous forme de composés chimiques ;
- les argiles ;
- les pierres gemmes ;
- les saumures.

Sont exclus des minéraux industriels :

- la plupart des minéraux métalliques ;
- les combustibles ;
- les eaux minérales.

L'**exploitation** des minéraux industriels fait souvent appel à des procédés d'exploitation et de traitement relativement complexes, ce qui influence grandement l'exploitabilité d'un gisement. Le **marché** est une autre contrainte importante dont il faut tenir compte. Pour certaines substances le marché est très morcelé, leur vente et leur distribution deviennent donc très complexes. Pour d'autres, le marché est contrôlé par une ou plusieurs entreprises importantes, ce qui laisse peu de place à de nouvelles exploitations. Pour certaines substances très abondantes, c'est la proximité des clients potentiels qui devient le critère le plus important.

Propriétés, usages et types de gisement



Apatite



Barytine



**Calcaire, dolomie
et marbre**



Feldspath



Graphite



Grenat



Kaolin



Magnésite et brucite



Mica



Minéraux de lithium



Silicates d'alumine



Silice



Syénite à néphéline



Talc et stéatite

Les minéraux industriels servent dans diverses industries en raison de leurs propriétés physiques ou chimiques telles la dureté, la blancheur, la pureté, l'inertie chimique, la conductivité thermique et électrique.

Les minéraux industriels sont utilisés dans les céramiques, le verre, le papier, le plastique, les produits chimiques, les charges minérales, la filtration, les absorbants, les réfractaires, les fonderies, l'électronique, l'optique, les abrasifs, les produits de friction, les matériaux de construction et pour des usages environnementaux et agricoles.

Les roches

1. Concepts

Qu'est-ce qu'une roche ?

3 approches menant à 3 définitions complémentaires :

A quoi ça sert ?

Une **roche** est fondamentalement un **matériau de l'écorce terrestre**. C'est cette approche pratique, utilitariste ou technique qui est développée en cycles 1 et 2. Une roche est un matériau exploité pour construire des routes, des maisons, des objets...

De quoi est-ce fait ?

Une **roche** est un habituellement un **solide** composé d'un **assemblage de minéraux**. Certaines roches peuvent cependant être liquides (pétrole) ou gazeuses (gaz naturel). Pour un géologue c'est un caillou, et le terme n'a rien de péjoratif. L'étude des roches est la **pétrographie** (du latin *petrus* = pierre). Un **minéral** est un assemblage d'atomes ordonnés formant une espèce chimique naturelle. Pour un naturaliste, un beau minéral est un solide bien cristallisé (un **crystal**), même si un minéral refroidi trop vite donne un verre amorphe non cristallisé. L'étude des roches est la **minéralogie** qui fait appel à la **crystallographie** et à la **crystallochimie**.

Cette approche peut être réalisée avec les enfants dès le cycle 2 et poursuivie au cycle 3 dans le cadre de la connaissance de la matière

D'où viennent les roches ?

C'est une toute autre approche, beaucoup plus conceptuelle et qui ne peut être réalisée qu'au cycle 3, même si les termes définis ici peuvent être employés beaucoup plus tôt. Lorsqu'on s'intéresse aux conditions de formation des roches on fait appel à une compréhension globale des mécanismes géologiques.

L'origine des roches nous permet de les classer classiquement en trois groupes:

- roches **sédimentaires** issues d'un **sédiment**
- roches **magmatiques**, issues d'un **magma**
- roche **métamorphique**, issue d'une autre roche (sédimentaire ou magmatique)

a - les roches sédimentaires

Les **roches sédimentaires** sont issues d'un sédiment par **diagénèse**. Les sédiments se déposent dans les bassins sédimentaires (et donc dans l'eau de mer), sauf quelques sédiments lacustres (de lacs non salés) ou franchement terrestres (éboulis, sédiments glaciaires comme le loess...). Un sédiment est une accumulation d'éléments d'origine **biologique**, minérale et chimique. Le sédiment est un milieu de vie, il comporte encore une grande quantité d'eau. Une roche sédimentaire est souvent un mélange d'éléments de différentes tailles et de différentes origines, ce qui fait que les classifications sont variées. Chacune, mettant l'accent sur quelques propriétés, est utilisée par tel ou tel spécialiste. Nous n'en donnerons aucune.

minéraux	
	calcite ou aragonite (CaCO ₃), dolomite (Ca,Mg)CO ₃ par remplacement partiel du Ca dans la calcite
	quartz (SiO ₂)
	calcite (CaCO ₃)
	argiles (Si,AL, Fe, Mg SiOx) calcite (CaCO ₃)
	argiles (Si,AL, Fe, Mg SiOx)
	argiles (Si,AL, Fe, Mg SiOx) calcite (CaCO ₃)
	quartz, calcédoine, opale (SiO ₂)
	quartz, calcédoine, opale (SiO ₂)

b - les roches magmatiques

Les **roches magmatiques** sont issues d'un **magma**. Elle peuvent avoir refroidi lentement et en profondeur, elles sont alors bien cristallisées (on parle de **roches cristallines**): ce sont les **roches plutoniques**. Ou bien elles peuvent aussi s'être écoulées ou avoir projetées par explosion en surface et donner ainsi des **roches volcaniques** en coulées (plus liquides) ou en amas, pitons ou cheminées (laves plus visqueuses), ou en dépôts de cendres ou autres produits de plus grande taille (cendres< lapillis<bombes). Les roches volcaniques cristallisent plus rapidement que les roches plutoniques et possèdent souvent de cristaux de moins grande taille (l'expérience la plus simple réalisable dès le cycle 2 est la cristallisation de la vanilline - Certaines roches volcaniques solidifiées trop vite n'ont pas cristallisé et donnent des verres (roches vitreuses).

c - les roches métamorphiques

Les **roches métamorphiques** sont issues soit de roches sédimentaires (roches **paramétamorphiques**), soit de roches magmatiques (roches **orthométamorphiques**), soit encore de roches déjà métamorphisées (roches **polymétamorphiques**). Le domaine du métamorphisme dans lequel les roches subissent donc un métamorphisme, c'est-à-dire une transformation à l'état solide, se situe entre le gradient géothermique le plus faible (6 °C par kilomètre) et le solidus du granite hydraté (apparition du magma).

2. Formulations par cycle

La géologie semble être cantonnée au cycle 3 (volcans, séismes et évolution) mais il est clair que les questions sur la terre et le monde minéral débutent bien avant: d'où le travail ci-dessous pour vous aider à formuler les concepts vus ci-dessus.

Cycle 1

Les **roches** sont les **matières non vivantes** qui constituent la terre. Les cailloux, les rochers, mais aussi le sable, sont des roches plus ou moins transformées par la pluie, le vent ou la mer. Les roches sont souvent recouvertes de terre, qui forme le **sol**, et dans laquelle de nombreux petits êtres vivants vivent. Les roches forment le **sous-sol**.

Cycle 2

Une **roche** est un **matériau naturel terrestre**.

De nombreuses roches sont transformées par l'homme pour servir de **matériaux** dans la construction ou les travaux publics : sables et graviers, granites, calcaires, marbres, craies ...exploitées dans des carrières. Il existe des roches très particulières composées de matière organique morte enfouie profondément : le pétrole (un liquide plus ou moins visqueux), le gaz naturel (un gaz) et le charbon (un solide)

Cycle 3

Une **roche** est un **matériau naturel terrestre** composé habituellement de **minéraux**: Elle est habituellement solide mais peut être liquide (pétrole) ou gazeuse (gaz naturel). Une roche solide peut être dure (granite) ou moins dure (argile). Une roche solide peut être cohérente (calcaire) ou meuble (sable)

I. Définitions d'un matériau

Un matériau est tout produit (naturel ou artificiel) qui peut être utilisé pour fabriquer des objets.

C'est aussi toute substance, ou matière pouvant destinée à être mise en forme :

- ✓ **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** : ils n'existent pas dans la nature ; il faut donc un travail humain ou animal pour transformer des matériaux naturels afin de créer de nouveaux matériaux. C'est ce qu'on appelle **les matériaux de synthèse**.
 - *les métaux* que l'on extrait à partir des minéraux (cu, zn, ar, al, pb...)
 - *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 peuvent être regroupés en grandes familles selon l'organigramme suivant :

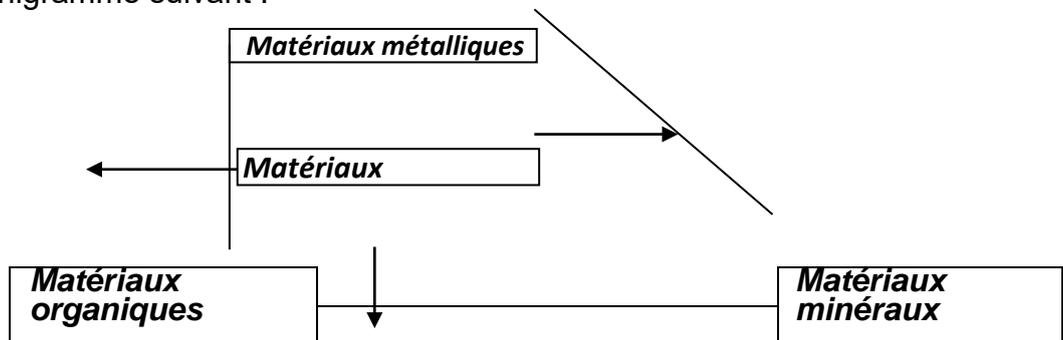


Figure 1.1 : Les grandes familles des matériaux

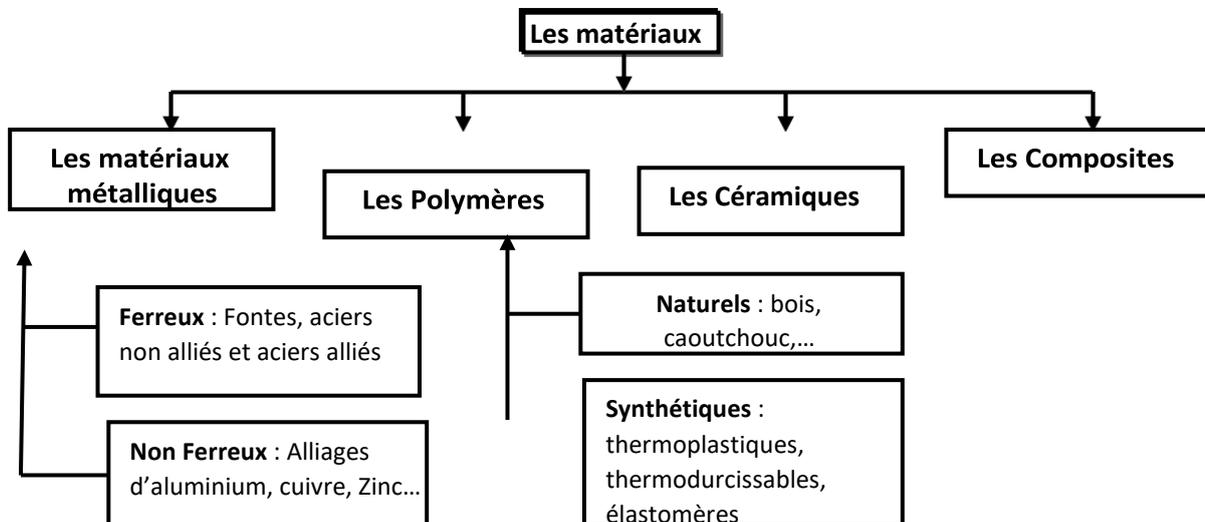


Figure 1.2: Classification des matériaux

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 œuvre : usinabilités, soudabilité, trempabilité...
- ✓ Caractéristiques économiques : prix, disponibilité, expérience industrielle

Le classement entre grandes familles de matériaux repose en grande partie sur le type de liaison entre les atomes. Il faut le considérer comme indicatif, le passage d'une catégorie à l'autre pouvant se faire en fonction de la composition chimique et des conditions de mise en œuvre (exemple des verres métalliques). Le *tableau 1* donne une indication des principales propriétés usuelles des polymères, des céramiques et des alliages métalliques.

Tableau 1.1 : Quelques propriétés usuelles des grandes familles de matériaux

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)

Les composites réalisant généralement une combinaison de ces différentes propriétés, optimisée selon l'emploi du matériau considéré. La figure 1.3 montre quelques possibilité ou combinaisons pour l'obtention des matériaux composites.

Comment choisir un matériau ?

Les différentes sollicitations que supportent les matériaux

Les sollicitations subies par une pièce, selon les différentes étapes de sa vie, ont comme effet de la déformer, de modifier la structure et éventuellement de détruire le matériau qui la constitue.

- Les sollicitations mécaniques qui sont prises en compte sont les contraintes extérieures, la pression, les vibrations et les chocs.
- Les sollicitations thermiques concernent la dilatation, la conduction de chaleur, les changements de phases et parfois la fusion ou l'évaporation.
- Les sollicitations physiques sont liées surtout au comportement électromagnétique (comportement magnétique, conduction électrique), mais aussi à l'effet des rayonnements.
- Les sollicitations chimiques concernent le comportement à la corrosion, la réactivité chimique, sans oublier le devenir du matériau abandonné dans l'environnement.

Les trois classes de solides

En fonction de la nature des liaisons de cohésion dans un solide, la Science des matériaux identifie trois classes de solides : les métaux, les céramiques et les polymères.

Les métaux et leurs alliages

Parmi les éléments purs, on dénombre 84% de métaux. Ce sont des atomes qui possèdent des électrons périphériques peu liés au noyau et facile à capter.

Cela signifie qu'il est aisé d'obtenir des ions, ce qui a deux conséquences :

- Dans la nature, les métaux sont sous forme de sels très stables, le plus souvent des oxydes ou des sulfures. Il faut une grande quantité d'énergie pour réduire ces sels et obtenir l'état de métal. Leur élaboration sera donc énergivore.
- Les métaux s'oxydent facilement et sont donc (presque) tous capables de se corroder. C'est malheureusement un cas majeur de « ruine » des matériaux métalliques très fréquent.

A l'état solide, c'est évidemment la liaison métallique qui s'impose. De ce fait, tous les métaux sont cristallisés et très conducteurs de l'électricité et de la chaleur.

L'état cristallin procure aux métaux des propriétés mécaniques particulières et extrêmement importantes, et qu'il convient de citer dès maintenant :

- La plupart des métaux manifestent un comportement de déformation plastique appelé ductilité. Cet étrange phénomène s'explique par la grande facilité de déplacement de certains défauts (dislocations) dans l'édifice cristallin des solides à liaisons métalliques. C

Si les éléments de base nécessaires pour élaborer les céramiques sont très courants (sables et roches), ces matériaux ne possèdent pas de procédés de mise en forme et d'assemblage aussi performant que ceux des polymères et des métaux. Et, surtout, le caractère fragile de leur comportement mécanique les rend inaptes à constituer des pièces de structure.

Les céramiques

La cohésion de ces solides repose sur des liaisons iono-covalentes. Ils sont obtenus par réaction d'un métal et d'un métalloïde léger, comme le bore, le carbone, l'azote, l'oxygène, ou un mélange de ces derniers.

Ce sont les matériaux des records ! Record de dureté, de rigidité, de résistance, de température de fusion. On peut les séparer en deux grandes familles :

- Les céramiques naturelles, comme par exemple le sable, le quartz, le diamant, le grès, les roches. Ces matériaux sont connus pour leur dureté, leur caractère réfractaire (ils ne s'oxydent pas à haute température) et leur température de fusion très élevée. Mais ils sont tous fragiles.
- Les céramiques de synthèse reconstituent des oxydes, carbures, et autres nitrures de métaux grâce à des procédés d'élaboration souvent complexes. Certaines de ces céramiques, dites traditionnelles, sont connues depuis longtemps et universellement employées, surtout dans le génie civil. Par exemple le verre, les terres cuites (tuiles et briques), les isolants fibreux (laine de roche), l'alumine ou le corindon. D'autres céramiques de très hautes performances, dites techniques, sont présentes dans les outils d'usinage les plus performants, du fait de leur dureté exceptionnelle et de leur résistance à l'usure record. Enfin, certaines céramiques sont indispensables pour fabriquer les équipements travaillant à très haute température : fours, turbo-réacteurs, creusets et pièces pour la fonderie.

Si les éléments de base nécessaires pour élaborer les céramiques sont très courants (sables et roches), ces matériaux ne possèdent pas de procédés de mise en forme et d'assemblage aussi performant que ceux des polymères et des métaux. Et, surtout, le caractère fragile de leur comportement mécanique les rend inaptes à constituer des pièces de structure.

Les polymères organiques

Les polymères organiques proviennent de la polymérisation de molécules organiques légères (éléments légers) souvent simples, appelées monomères, et possédant au moins deux extrémités réactives. Celles-ci permettent de lier ces molécules entre elles et de former ainsi des chaînes carbonées très longues (jusqu'à un million d'atomes) et plus ou moins ramifiées, le long desquelles les atomes sont liés entre eux par des liaisons covalentes très fortes

Les matériaux hybrides

Les matériaux hybrides sont constitués de plusieurs matériaux « élémentaires » différents, qui conjuguent leurs propriétés pour améliorer les performances d'un objet.

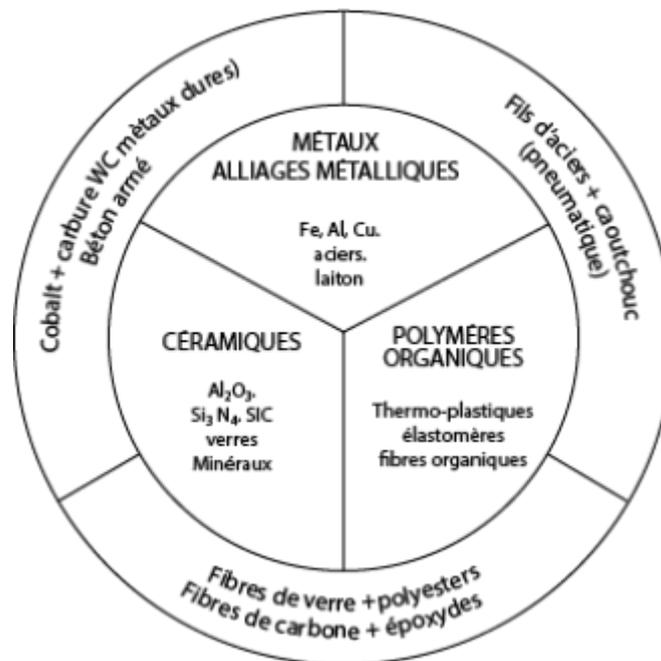
Cette conjugaison peu se faire dans la masse du matériau, le plus souvent à l'échelle de la microstructure (quelques dizaines de microns) et conduit aux matériaux composites.

Elle peut aussi uniquement affecter la surface d'une pièce et provenir d'un revêtement ou d'un traitement de surface.

Les matériaux composites

Les matériaux composites ne forment pas une classe de matériaux à part. Ils sont obtenus par mélange de matériaux provenant chacun de l'une des trois classes précédentes. Leurs propriétés se trouvent modifiées de façon continue par la proportion de chaque composant.

En voici quelques exemples :



Exemples de matériaux composites

Ces matériaux forment donc un compromis de comportement mécanique entre des composants de propriétés opposées. Par exemple, l'un est très dur et l'autre mou. Mais le premier est fragile, le second très tenace. On compense donc les défauts de chacun avec les avantages de l'autre.

PROPRIETES DES MATERIAUX

Quelques définitions

La science des matériaux est l'étude des relations qui existent entre leur structure et leurs propriétés générales

La structure d'un matériau correspond à la façon dont s'agencent ses éléments constitutifs

Plusieurs échelles

- Échelle subatomique : noyau et électrons
- Échelle atomique : disposition des atomes ou molécules les uns par rapport aux autres
- Échelle microscopique : groupes d'atomes
- Échelle macroscopique : éléments de structure visibles à l'œil nu

Qu'entend-on par propriétés d'un matériau ?

Tous les matériaux interagissent avec des agents extérieurs lorsqu'ils sont utilisés

Par exemple :

- Un matériau sur lequel s'exerce une force subit une déformation
- Une surface métallique polie réfléchit la lumière...

6 grandes catégories de propriétés

- Mécaniques
- Électriques
- Thermiques
- Magnétiques
- Optiques
- Chimiques

Propriétés mécaniques

Elles concernent la déformation d'un matériau soumis à une force

Les principales sont :

- La résistance : caractérise la contrainte maximale que peut supporter un matériau avant de se rompre
 - La dureté : résistance d'un matériau à la pénétration
 - La ductilité : capacité du matériau à se déformer de manière irréversible avant de rompre
 - La rigidité : fonction de l'intensité des liaisons entre atomes ou molécules (module d'Young)
- La ténacité : capacité d'un matériau à emmagasiner de l'énergie avant sa rupture

Quand un corps est soumis à l'action de forces extérieures des contraintes internes s'établissent à ces contraintes sont associées des déformations

Introduction

Les métaux et alliages industriels sont des corps constitués de divers constituants caractérisant ses propriétés et ses caractéristiques. L'identification de ses constituants, est avéré indispensable pour déterminer les relations entre le comportement et la tenue en services des matériaux. On appelle microstructure des matériaux l'ensemble des paramètres microstructuraux décrivant les constituants des matériaux à l'échelle microscopique. Un matériau est formé d'une multitude de petits volumes polyédriques appelés grains et phases dont la taille varie en général de **1 µm** à plusieurs **mm**.

En conséquence, La maîtrise de nouveaux matériaux a été à l'origine de révolutions dans l'histoire des technologies. Les âges de la préhistoire sont d'ailleurs définis par les matériaux employés, âge de la pierre, âge du bronze, du fer. Aujourd'hui, le nombre de matériaux ou en tout cas le nombre de références est considérable et en constante révolution. En effet, la science des matériaux permet de concevoir de nouveaux matériaux adéquats pour chaque nouvelle application. On pourra distinguer deux grandes catégories de matériaux :

- (1) les matériaux de structure, faisant l'objet de ce cours et qu'on utilise

essentiellement pour leurs capacités à soutenir des sollicitations mécaniques et thermiques.

(2) les matériaux fonctionnels, qu'on utilise pour leurs propriétés physiques, telles que conductivité ou semi-conductivité électrique, magnétisme, propriétés optiques ...

En effet, on caractérise les propriétés d'un matériau à une échelle donnée. A cette échelle le matériau est considéré comme homogène et continu. Si l'échelle à laquelle est caractérisée la propriété est comparable à l'échelle de l'hétérogénéité interne du matériau. Les résultats seront, en conséquences, dispersés.

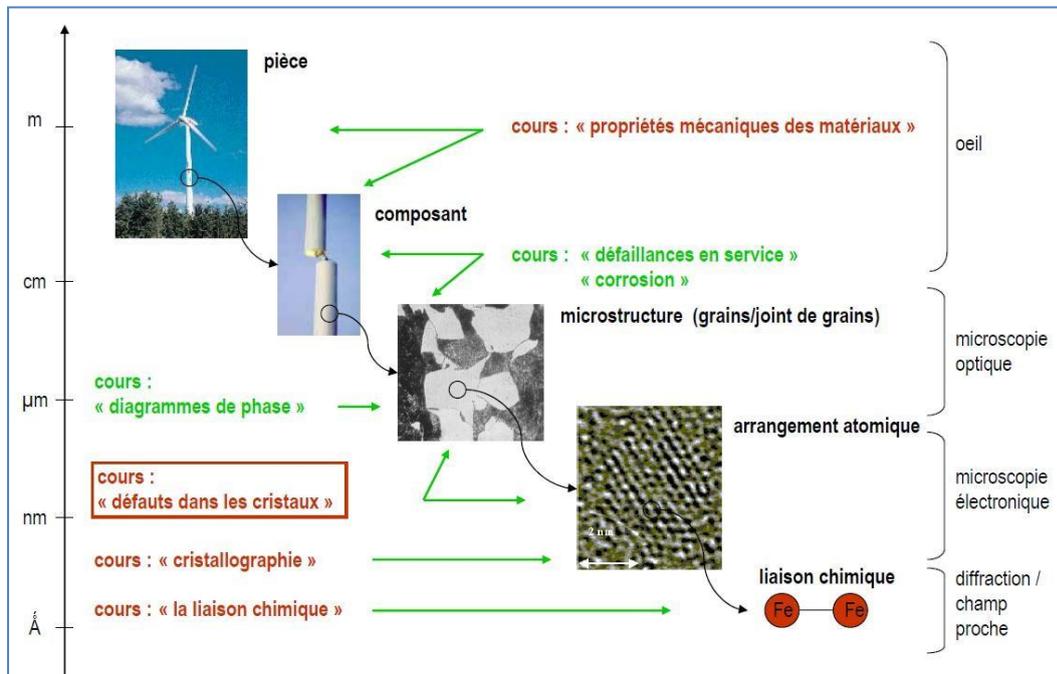
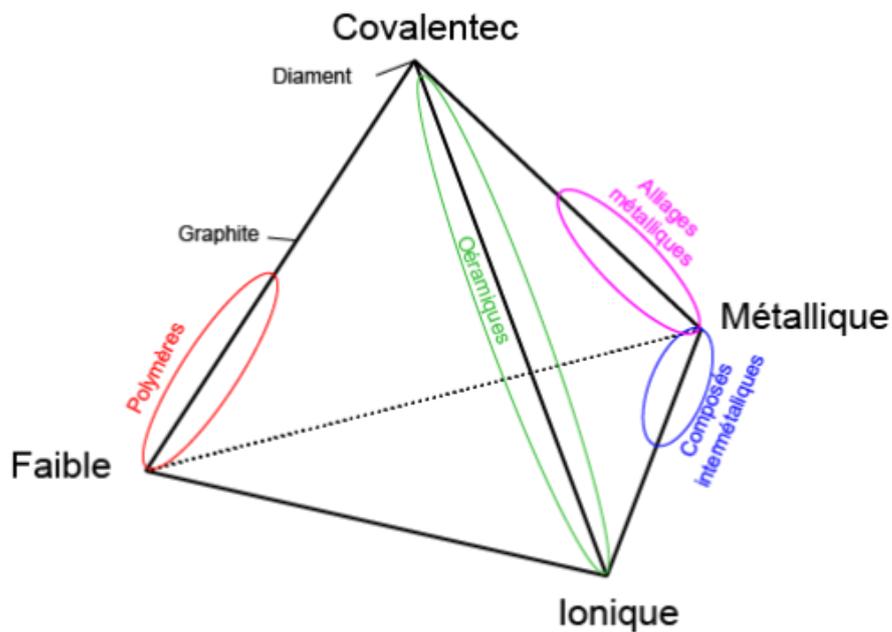


Fig.2.1. Différentes échelles de l'étude de la matière

Le caractère mixte des liaisons

Il faut considérer ces définitions comme assez théoriques car, dans de nombreux cas, la cohésion d'un solide ne repose pas entièrement sur un seul type de liaison. Ceci explique que certaines propriétés apparaissent parfois comme contradictoires avec le type de liaison considéré. Par exemple, la liaison métallique forme des solides dont la température de fusion n'excède pas, en moyenne, 1000°C. Cependant, quelques métaux fondent à des températures beaucoup plus élevées, du fait du caractère partiellement covalent de la liaison. Le cas extrême concerne le Tungstène (symbole W pour Wolfram en allemand) dont l'incroyable température de fusion de 3200°C le classe en deuxième place, après le carbone à 3500°C (liaisons strictement covalentes).

La figure suivante illustre le cas de quelques solides liés par des liaisons diverses.



Propriétés des matériaux durant leur cycle de vie

Type de liaisons atomiques

Liaison	Exemple		Propriétés				
			T _f	E	α	ρ	D
Covalente	C	électrons partagés	e	e	f	m à e	0 à f
Ionique	NaCl	électrons attirés	m à e	e	f	e	0
Métallique	Cu	électrons délocalisés	m à e	m	m	f	e
Liaisons faibles	H ₂ O	attraction dipolaire	f	f	e	e	m

T_f = température de fusion

e = élevé

E = module d'élasticité en tension

m = moyen

α = coefficient de dilatation linéaire

f = faible

ρ = résistivité électrique

Elles sont directement reliées à la couche périphérique, elles sont de trois types

- ❖ Liaison ionique
- ❖ Liaison covalente
- ❖ Liaison métallique

Liaison ionique

Cette liaison se caractérise par l'échange d'électrons entre deux atomes. Cette liaison est forte suite à la saturation de la couche extérieure des atomes qui deviennent des ions. Cette liaison concerne essentiellement les éléments qui ont peu d'électrons sur leur couche externe (soient les colonnes 1 et 2 du tableau périodique) et les éléments qui ont des couches externes presque saturées (colonnes 16 et 17 du même périodique). Par exemple, le sodium Na, présente une structure électronique comme suit : $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^1$. Il devient donc un ion Na^+ . Par ailleurs, le Chlore Cl, présente une structure électronique comme suit $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^5$, il devient donc un ion Cl^- , on obtient ainsi le composé stable **NaCl**. Cette liaison est forte car elle stabilise fortement la structure électronique des atomes en saturant leur couche électronique externe.

La réaction $\text{K}^+ + \text{Cl}^-$ à titre d'exemple, donne **KCl** libère ainsi une énergie de 374

kJ/mole. Exemple-typique d'une liaison ionique $\text{LiF} \rightarrow \text{Li}^+ +$

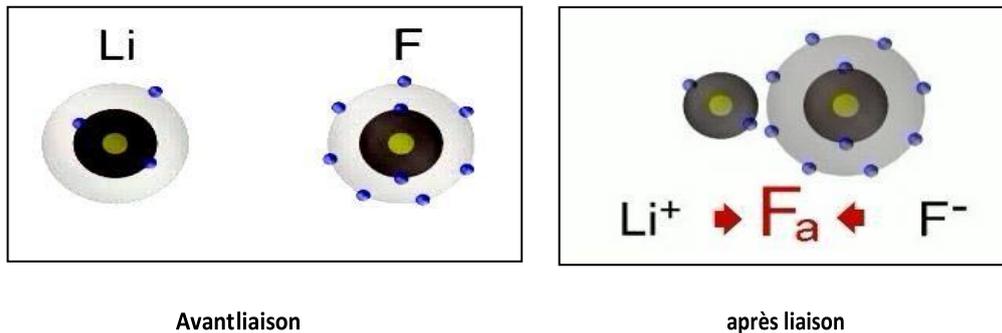


Fig. 2.2. Mise en évidence d'une liaison ionique (cas de fluorure de lithium)

Les matériaux constitués à l'aide des liaisons ioniques sont caractérisés par: une mauvaise conductivité thermique, transparent, fragile, haut point de fusion.

Liaison covalente

Cette liaison se caractérise par la mise en commun d'électrons afin de saturer les couches électroniques externes de chacun des atomes mis en liaison. Cette liaison permet par exemple d'expliquer l'association de deux atomes d'hydrogène pour former la molécule de dihydrogène. La liaison covalente est également une liaison forte puisque elle permet de saturer la couche électronique externe des atomes.

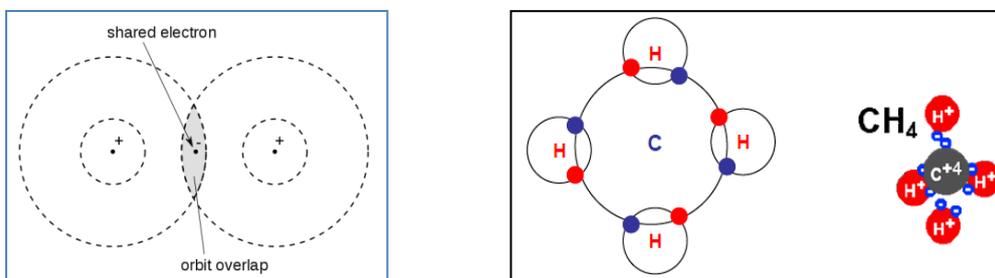


Fig.2.3. Schéma de liaisons covalentes: Cas de dihydrogène H_2 et le CH_4

Liaison métallique

Cette liaison se caractérise aussi par la mise en commun d'électrons entre plusieurs atomes afin de saturer les couches électroniques externes. A la différence de la liaison covalente, la liaison métallique est délocalisée, c'est-à-dire que chaque atome peut être considéré comme un ion baignant dans un gaz d'électron. Elle se produit entre les métaux elle est accompagnée par la formation des électrons libres. Elle est forte et non directionnelle.

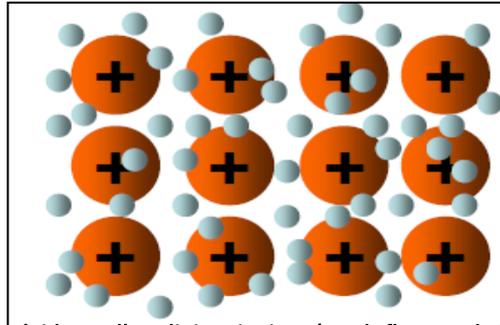


Fig. 2.4 : Mise en évidence d'une liaison ionique (cas de fluorure de Sodium)

Le tableau ci-dessous donne des exemples typiques pour des liaisons interatomiques de certaines substances chimiques. Ici on s'intéresse aux liaisons les plus communément connues

Liaison	Matériaux	caractéristiques
Ionique	NaCl, Al ₂ O ₃	Mauvaise conductivité électrique, fragile, transparente, haute point de fusion
Covalente	Si, diamant	Mauvaise conductivité électrique, très grande dureté, haut point de fusion
métallique	Na, Al, Cu, Fe, W	Bonne conductivité électrique et thermique, facilement déformable, opaque

Force de répulsion:

Les forces de répulsion entre les atomes ont pour origine l'interaction de leurs couche électronique : lorsque deux atomes sont très proches l'une de l'autre, les couches électroniques des deux atomes sont plus proche l'une de l'autre, que du noyau de l'autre, ou encore que des deux noyaux.

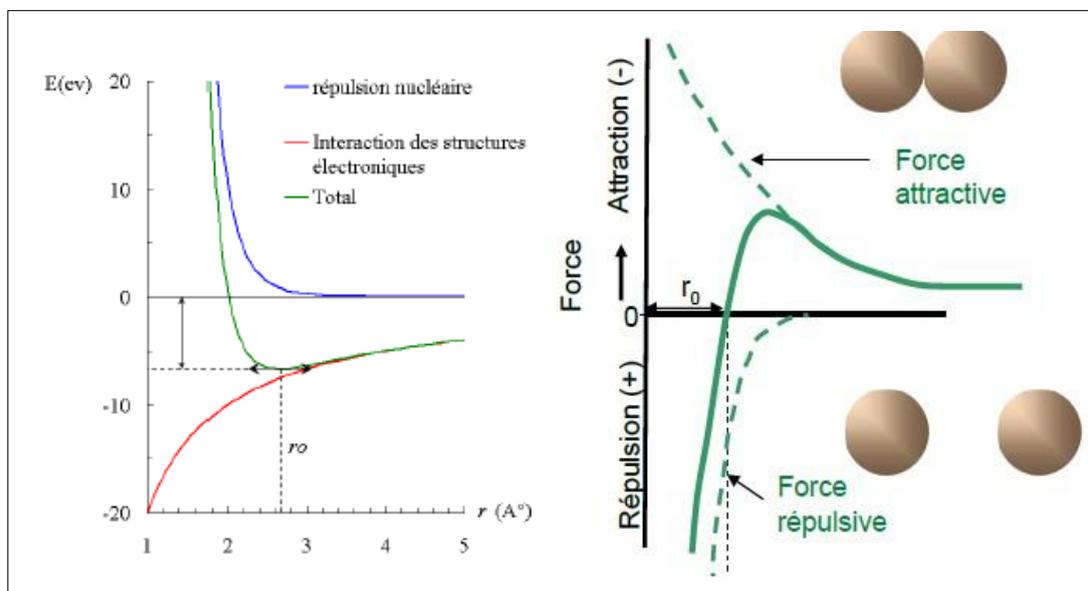


Fig. 2.5. Illustration,

(a) potentiel d'interaction découlant des forces nucléaires répulsives et des interactions attractives.

(b) Force associée,

GENERALITES SUR LES MATERIAUX

Introduction

Les matériaux sont omniprésents dans notre quotidien. Il n'est pas de structures, d'infrastructures sans matériaux. Il n'est pas de transport ni de production d'énergie sans matériaux. On les dit aujourd'hui nano-structurés, architecturés ou bien encore intelligents. Ils occupent une place fondamentale dans l'activité économique mondiale et sont également l'objet d'une attention particulière de la part des acteurs académiques qui n'ont de cesse de les améliorer, de les adapter et de les optimiser pour répondre aux exigences technologiques, environnementales et sociétales croissantes.

Les matériaux industriels pour l'ingénieur

- Introduction
- Les matériaux métalliques industriels
- Les grands polymères industriels
- Les céramiques industrielles
- Conclusion

Les matériaux métalliques industriels

Les métaux :

Les métaux sont des matériaux dont les éléments chimiques ont la particularité de pouvoir former des liaisons métalliques et perdre des électrons pour former des cations (exemple : $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ ou Fe^{3+}). Ils peuvent être caractérisés aussi bien de manière physico-chimique que de manière électronique.

Les métaux se caractérisent par plusieurs particularités physiques. Ils sont de bons conducteurs électriques, cette caractéristique se mesure soit grâce à la conductivité soit grâce à son inverse, la résistivité. Ils sont aussi de bons conducteurs thermiques et possèdent un éclat lumineux.

Ils sont généralement paramagnétiques voire ferromagnétiques. Leur température de fusion et de vaporisation sont en général élevées. Les métaux sont pour la plupart ductiles et relativement tenaces et l'association de leur ténacité et de leur ductilité est un atout majeur pour leur mise en forme. Par contre, après mise en forme, on peut facilement donner aux alliages métalliques une bonne résistance mécanique par des traitements thermiques appropriés grâce à la précipitation de phase durcissantes (durcissement structural). Du fait de leur plasticité, leur tenue à la fatigue peut poser des problèmes et ils sont de plus souvent sensibles à la corrosion. Enfin, les métaux sont en général des matériaux lourds et denses ce qui est parfois un handicap.

Du point de vue mécanique, ils se caractérisent par des propriétés telles que leur module d'élasticité (généralement élevé, de l'ordre de plusieurs GPa), leur dureté, leur ductilité, etc.

Sur Terre, on ne trouve quasiment les métaux que sous forme d'oxydes. Cependant, ils sont peu utilisés sous cette forme (sauf dans le domaine de la microélectronique). On préfère les utiliser purifiés (exemples du cuivre et de l'aluminium) ou sous forme d'alliages. L'aluminium est le métal le plus abondant dans la croûte terrestre, suivi du fer, qui est très souvent utilisé sous forme d'acier ou de fonte après ajout de carbone.

Du point de vue économique, on note deux secteurs extrêmement importants, celui de l'acier et celui de l'aluminium.

Certains matériaux s'associent pour former des alliages.

Alliages à base de fer

Les alliages à base de fer (aciers et fontes) ont un rôle capital sur le plan technologique. Ils constituent en masse près de 90 % de la production mondiale de matériaux métalliques. Plusieurs facteurs expliquent cette importance : les alliages ferreux se prêtent facilement à une production en masse, ils sont bon marché et on peut les acquérir sous des formes très variées grâce à la diversité des traitements thermiques et des éléments d'addition. Ils ont un fort module d'élasticité et une forte limite élastique. On peut distinguer:

Alliage ferreux

Les aciers

Aciers spéciaux

Aciers pour traitements thermiques.

Aciers à outils,

Aciers inoxydables,

les fontes.

Alliage d'aluminium

Alliage d'aluminium corroyés

Alliages d'aluminium de fonderie

Alliages non ferreux

Ils ne représentant que 10 % des matériaux métalliques utilisés dans l'industrie, mais ils les n'en restent pas moins utilisés pour certaines de leurs propriétés spécifiques : masse volumique faible, propriétés électriques, résistance à la corrosion et à l'oxydation, facilitée de mise en œuvre. Ces avantages l'emportent dans certaines applications, malgré le coût de revient plus élevé de ces alliages.

Alliage de cuivre.

Cuivre pur

Laitons

Bronzes

Cupro-Nickels

Alliages cuivre-béryllium et cuivre-chrome

Alliages à durcissement structural.

Alliages de magnésium.

Alliages de zinc.

Alliages de titane.

Alliage de nickel.

Alliages nickel-cuivre

Alliages nickel-chrome et nickel-chrome-fer

Alliages nickel-molybdène

Alliages nickel-fer

Les grands polymères industriels

Polymères : matières plastiques

Un polymère est une substance composée de macromolécules organiques (ou parfois minérales). Les macromolécules sont constituées d'un enchaînement répétitif d'au moins un type de monomère. Les monomères sont reliés entre eux par des liaisons covalentes. Les chaînes de polymères interagissent entre elles avec des forces plus faibles comme les liaisons de van der Waals.

Les propriétés des polymères dépendent notamment du type de monomère(s), de la nature de leur assemblage et du degré de polymérisation.

On distingue les polymères naturels, les modifiés (polymères artificiels) et les synthétiques. On peut aussi les classer selon leur architecture. On distingue par exemple les polymères linéaires, branchés (avec des ramifications) ou non, les dendritiques (ramifications dans les trois dimensions) et les réticulés ou tridimensionnels qui forment un réseau.

Les polymères peuvent être fabriqués de diverses façons. On peut citer:

les homopolymères : fabriqués avec le même monomère ;

les copolymères : fabriqués avec des monomères différents.

Un autre type de classification des polymères est aussi selon leurs propriétés thermomécaniques. On distingue:

les polymères thermoplastiques :

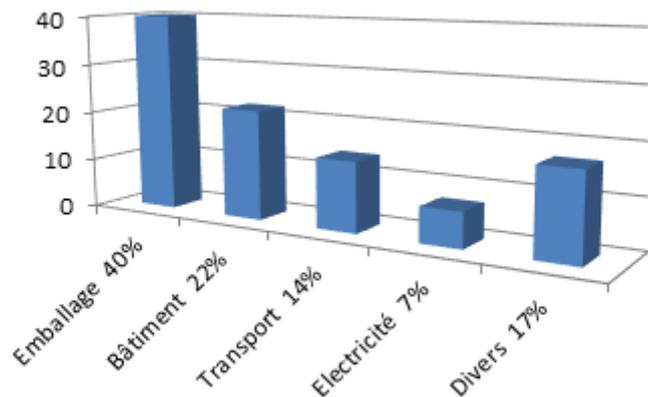
les polymères thermodurcissables

les élastomères :

Les thermoplastiques se trouvent à l'état fondu (état fluide ou déformable) s'ils sont portés à une température suffisante, et sont donc susceptibles de s'écouler sous l'action d'une contrainte. Cela permet leur mise en forme par les techniques d'extrusion, d'injection, de thermoformage, etc. C'est le cas des polyoléfines (PE, PP, PMP, etc.), du PVC, du polystyrène, etc. ;

Les thermodurcissables

Domaines d'application des polymères



Répartition des domaines d'application des polymères 

Les trois grandes familles de polymères

- Les polymères linéaires thermoplastiques.
- Les polymères thermodurcissables.
- Les élastomères

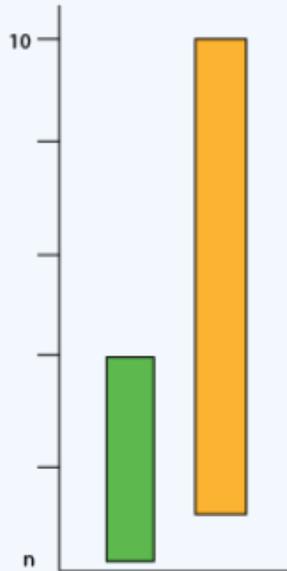
Comparaison entre les thermoplastiques et les thermodurcissables

Les deux grandes familles de polymères se distinguent nettement en termes de propriétés mécaniques. Les thermodurcissables sont liés par moins de liaisons faibles que les thermoplastiques.

Aussi la résistance et la rigidité de ces matériaux seront plus élevées, comme on peut le voir sur les diagrammes ci-dessous.

Module d'élasticité en tension

GPa



n



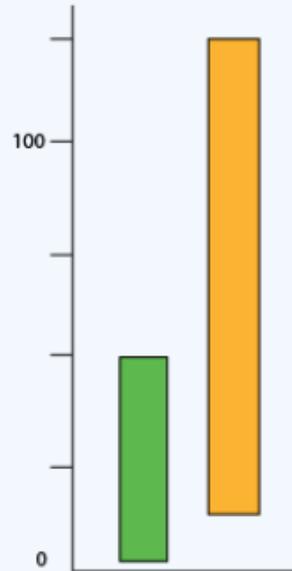
Polymères thermoplastiques



Polymères thermodurcissable

Résistance en traction

MPa



100

0

Comparaison entre les thermoplastiques et les thermodurcissables/ 

Les céramiques industrielles

Céramiques

Celles-ci sont composées d'éléments métalliques et non métalliques. Elles sont généralement des oxydes, des nitrures, ou des carbures. Le groupe des céramiques englobe une vaste gamme de matériaux, comme les ciments, les verres, les céramiques traditionnelles faites d'argile, etc.

La structure cristalline des céramiques est plus complexe que celle des métaux, car au moins deux éléments chimiques différents sont présents. Il existe des céramiques ioniques, composées d'un métal et d'un non-métal (par exemple: NaCl, MgO) et les céramiques covalentes, composées de deux non métaux ou d'éléments purs (diamant, carbure de silicium, etc.). La structure des joints de grain est également plus complexe car des interactions électrostatiques entraînent des contraintes d'équilibre supplémentaires. Les ions de signes contraires ne doivent donc pas se toucher. C'est pourquoi la céramique présente une certaine porosité (environ 20 % en volume).

Elles sont caractérisées par des liaisons fortes, ce qui se traduit dans la pratique par une très bonne tenue en température et une excellente rigidité élastique. La faible tendance à la plasticité qui en résulte rend ces matériaux fragiles, peu tenaces, peu ductiles, mais en revanche, résistants à l'usure. Ces matériaux ont de hauts points de fusion et une bonne résistance à la corrosion. Les céramiques techniques de qualité ont tendance à être chères

Les céramiques ont de nombreux avantages :

- propriétés mécaniques : elles présentent, comme les métaux, un module de Young bien défini, c'est-à-dire que le module reste constant pendant l'application d'une charge (contrairement au polymère dont l'élasticité n'est pas linéaire). De plus, elles ont la plus grande dureté de tous les matériaux, et sont d'ailleurs utilisées comme abrasifs pour

couper (ou polir) les autres matériaux ;

- résistance aux chocs thermiques en raison d'un faible coefficient de dilatation ;
- bonne résistance chimique ;
- résistance à la corrosion ;
- isolations thermique et électrique.

Par contre, leur principale faiblesse est d'être prédisposée à rompre brutalement, sans déformation plastique en traction (caractère fragile) ; les porosités « affaiblissent » le matériau en entraînant des concentrations de contrainte à leur voisinage. La fragilité des céramiques rend impossible les méthodes de laminage ou de forgeage utilisées en métallurgie.

Ces matériaux souffrent de deux limitations importantes d'emploi :

- Une fragilité native, qui interdit l'utilisation des céramiques en tant que pièces de structure.
- Une mise en forme limitée au procédé de frittage.

Cette méthode, applicable aussi aux métaux, consiste à compresser dans un moule le matériau en poudre, puis à le chauffer. On assiste alors à une densification à chaud, à l'état solide, qui donne une pièce présentant quelques porosités, mais dont les performances mécaniques s'approchent de celles du produit compact.

Pour ces raisons, le domaine économique des céramique est petit, comparé à ceux des métaux et polymères, mais leur importance technique est majeure dans tous les cas où les objets doivent travailler longtemps à haute et très haute température, résister à l'usure ou à la compression.

Exemple:

En fonderie, le nitrure de silicium constitue de nombreuses pièces travaillant dans le métal liquide.



Image d'illustration | 

Il rentre également dans la fabrication de roulements à bille pour hautes températures (moteur, aérospatial).



Image d'illustration | 

L'alumine forme de très nombreuses pièces isolantes en électrotechnique (fusibles).

La zircone et l'alumine sont utilisées pour fabriquer des pièces de prothèse, du fait du caractère inerte de ces matériaux et de la très forte résistance à l'usure.

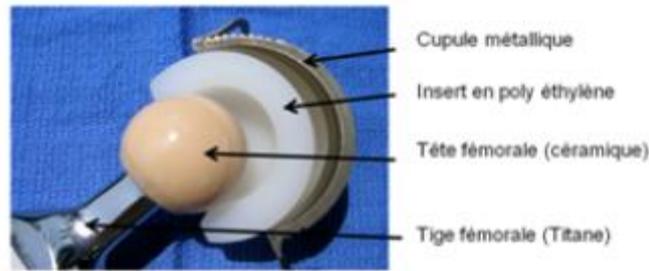


fig.1 : Les 4 composants d'une prothèse totale de hanche

Image d'illustration

Quelques applications des céramiques

Céramiques dans l'automobile

Cette utilisation se réduit à des composants du moteur. Leurs buts sont d'améliorer l'isolation thermique, la résistance à l'usure par frottement, d'alléger les pièces en mouvement. L'isolation thermique est l'un des points forts des céramiques, ainsi la préchambre de combustion (moteur diesel), la tête de piston et les soupapes d'échappement sont revêtues d'écrans thermiques en céramique. Pour améliorer le rendement du turbocompresseur, certains fabricants ont envisagé la conception du conduit d'échappement ainsi que la turbine en céramique.

On utilise pour ces applications des inserts en zircon (ZrO_2) et de titanate d'aluminium (Al_2TiO_5). La résistance à l'usure par frottement est une des propriétés remarquables des céramiques. Ainsi les culbuteurs, les guides et les sièges de soupapes sont en céramique (association de zircon et de nitrure de silicium (Si_3N_4)). Par souci d'allègement des masses en mouvement, on peut utiliser du nitrure de silicium pour les axes des pistons, les soupapes.

Céramiques pour les outils de coupe

Dans ce cas, on utilise principalement les propriétés de dureté et de tenue à haute température. Ainsi l'usinage des fontes, des aciers et des superalliages à base de nickel et de cobalt peuvent être exécutés avec des plaquettes en céramique. Pour les premiers, on utilisera l'alumine (Al_2O_3), pour les seconds, le nitrure de silicium. Le taux d'enlèvement est nettement amélioré (2 à 5 fois par rapport aux plaquettes carbures) même si le volume enlevé reste du même ordre. Le tournage continu est résolu par l'utilisation des céramiques mais le fraisage pose le problème des chocs.

Céramiques en biomécanique

La chirurgie et l'art dentaire font de plus en plus appel aux nouveaux matériaux pour une bonne biocompatibilité, une bonne tenue à la fatigue et une résistance élevée à la corrosion. Les céramiques utilisées comme remplacement des tissus durs (os, dents) peuvent être classées en trois groupes selon leur réaction avec le milieu physiologique :

- ✓ les céramiques inertes ou biodégradables (alumine)
- ✓ les céramiques bioactives (bio verres...) qui permettent une liaison entre le tissu et l'implant,
- ✓ les céramiques bio résorbables (phosphate de calcium) qui permettent la repousse des tissus.

Céramiques dans le nucléaire

Dans le nucléaire, les céramiques sont utilisées comme combustible : céramiques à base d'uranium, produits remplaçant l'uranium métallique pour les réacteurs à haute puissance. On les utilise aussi comme barre de contrôle. Matériau très absorbant neutronique, il sert à contrôler la réaction de fission nucléaire. Les céramiques servent globalement à la protection thermique et neutronique.

Les verres :

Ils sont essentiellement des solides obtenus par figeage de liquide surfondu. Les quatre principales méthodes de fabrication du verre sont le pressage, le soufflage, l'étirage et le fibrage.

Les verres sont des silicates non cristallins qui contiennent d'autres oxydes (CaO, par exemple) qui en modifient les propriétés. La transparence du verre est l'une de ses propriétés les plus importantes. Ceci est dû à sa structure amorphe et à l'absence de défauts de taille supérieure à la fraction de micromètre. L'indice de réfraction d'un verre est d'environ 1,5. Pour ce qui est de leurs propriétés mécaniques, les verres sont des matériaux fragiles, mais des traitements thermiques ou chimiques peuvent y remédier.

Matériaux composites

Un matériau composite est un matériau qui associe deux ou plusieurs matières différentes, appartenant parfois à deux classes distinctes, pour obtenir une combinaison de propriétés qui tire avantage de chacun. C'est aussi un mélange de deux matériaux (ou plus) de base, distincts à l'échelle macroscopique, ayant des propriétés physiques et mécaniques différentes.

Ce mélange est effectué de manière à avoir des propriétés optimales, différentes et en général supérieures à celles de chacun des constituants.

Un composite est constitué au moins d'une **matrice** (liant) et d'un **renfort**. Les constituants sélectionnés (certains sont multifonctions) peuvent améliorer les propriétés suivantes : rigidité, résistance thermomécanique, tenue à la fatigue, résistance à la corrosion, étanchéité, tenue aux chocs, au feu, isolations thermique et électrique, allègement des structures, conception de formes complexes.

a) La **matrice** est un liant qui protège les fibres et transmet également les sollicitations aux fibres ;

b) Le renfort ou les **fibres** apportent la tenue mécanique et supportent les sollicitations

c) Les **charges** et **additifs** améliorent les caractéristiques du matériau. Les charges abaissent souvent le coût de la matière (effet de dilution). Exemples d'additifs : anti-UV, fongicides, antioxydants.

Les propriétés thermiques

La dilatation des solides

Origine du phénomène de dilatation.

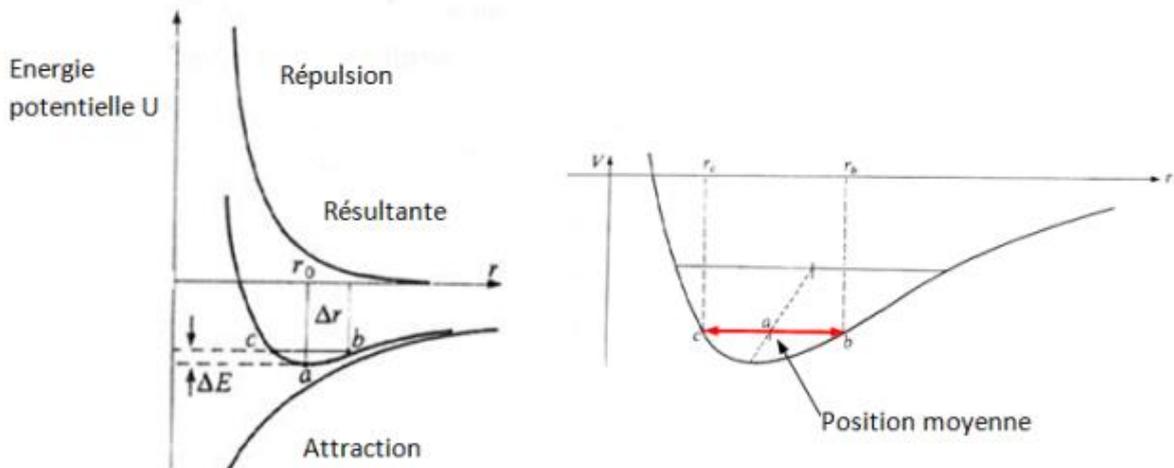
Tous les solides s'expandent sous l'effet d'une élévation de la température. Ce phénomène physique général ne souffre que quelques très rares exceptions. Cet effet de l'échauffement provient de l'augmentation de la distance moyenne interatomique due à l'agitation thermique.

On peut justifier ce fait en observant la courbe montrant l'évolution de l'énergie potentielle d'une liaison, U , (potentiel de Lennard-Jones) en fonction de la distance r qui sépare deux atomes impliqués dans une liaison. Cette courbe est la résultante de deux effets :

- la répulsion qui s'exerce entre les orbitales externes qui sont au contact. Les forces répulsives sont très intenses et de très courte portée. L'énergie potentielle de répulsion varie en $1/r^m$, avec m variant de 6 à 11 suivant le type de liaison.
- l'attraction entre les charges différentes : nuages électroniques et noyaux. Ces forces s'exercent à plus longue distance que les précédentes. L'énergie potentielle d'attraction varie en $-1/r^n$, avec n variant de 1 à 6.

Au voisinage de zéro K, et quelle que soit la nature de la liaison, ces courbes ont toujours la même allure et la résultante montre un minimum d'énergie potentielle, négative, lorsque les deux atomes se trouvent séparés par la distance d'équilibre de la liaison, r_0 .

De plus, la courbe résultante est asymétrique par rapport à la distance d'équilibre.



Si la température augmente, les atomes sont soumis à l'agitation thermique et vibrent autour de leur position moyenne. Si ΔE représente l'énergie cinétique des atomes (l'énergie thermique), les points b et c de la courbe sont les positions extrêmes d'un atome en vibration. L'asymétrie de la courbe fait que la position moyenne, a , se déplace vers la droite si la température et l'énergie cinétique augmentent : c'est à dire que la distance moyenne entre les deux atomes augmente et que le matériau se dilate.

Expérimentalement, ce fait est bien confirmé, par exemple par la mesure des paramètres de maille des systèmes cristallins en fonction de la température.

Grandeurs physiques exprimant la dilatation.

Idéalement, c'est la variation relative de volume $\frac{\Delta V}{V_0}$ qui caractérise l'expansion thermique d'un solide. Dans la pratique, c'est la mesure de la dilatation linéaire qui est la plus facile à réaliser et donc la donnée la plus fréquente dans la littérature technique.

Pour un échantillon de longueur initiale L_0 , on mesure l'allongement ΔL observé pour une variation de température ΔT . On calcule alors le coefficient de dilatation linéaire a :

$$a = \frac{\Delta L}{L_0} * \frac{1}{\Delta T} \text{ en Kelvins}^{-1}$$

La valeur de a diffère suivant la classe à laquelle appartient un matériau, c'est à dire la nature de la liaison qui en assure la cohésion.

Les courbes de Lennard-Jones des liaisons faibles, iono-covalentes et métalliques permettent de prédire que les céramiques sont les matériaux qui se dilatent le moins, les métaux moyennement et les polymères beaucoup.

	Coefficient de dilatation moyen en K^{-1}	Valeur la plus faible	Valeur la plus élevée
Céramiques	$5 \cdot 10^{-6}$	Silice = $0.54 \cdot 10^{-6}$	Verres = $12 \cdot 10^{-6}$
Métaux	$20 \cdot 10^{-6}$	Tungstène = $4.5 \cdot 10^{-6}$	Alcalins = $80 \cdot 10^{-6}$
Polymères	$80 \cdot 10^{-6}$	PMMA (plexi) = $5 \cdot 10^{-6}$	PE (p.éthylène) = $5 \cdot 10^{-6}$

Dans la pratique, la connaissance de a est importante pour :

- choisir des matériaux résistant aux chocs thermiques.
- associer entre elles des pièces de nature différente et prévoir les déformations.
- calculer des jeux fonctionnels, dans un moteur par exemple.

Si le matériau est macroscopiquement monocristallin et non cubique, on observe des coefficients a différents suivant les directions cristallographiques principales. On connaît même quelques solides qui présentent des dilatations négatives suivant une direction (graphite, plutonium), tout en montrant au total une expansion volumique positive quand T augmente.

Si le matériau est polycristallin et isotrope, le coefficient a est unique et ne dépend

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{3 \cdot \Delta L}{L_0}$$

pas de l'orientation. On a alors

Il est, par contre, fréquent d'observer des matériaux possédant une orientation préférentielle des grains multiples qui les constituent (métaux laminés, matériaux composites, solidification dirigée, etc.). La dilatation est alors elle-même anisotrope et requiert la détermination de a suivant plusieurs directions.

La capacité thermique

Sous l'effet d'un apport de chaleur dH , la température d'une mole de matériau augmente de dT .

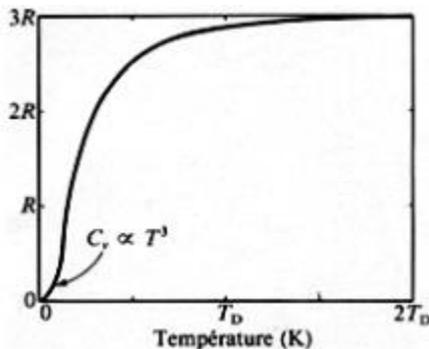
Pour les solides, on définit le plus souvent ce phénomène à pression constante par une grandeur caractéristique, appelée capacité calorifique ou capacité calorifique C_p :

$$C_p = \frac{dH}{dT_p}$$

Cette grandeur est nulle à $T = 0$ Kelvin.

A haute température, la loi de Dulong et Petit, provenant de la théorie de l'agitation thermique, montre que tous les solides doivent acquérir une capacité calorifique égale à $C_p = 3R$ par mole (R : constante des gaz parfaits), soit 25 J/mole/K.

Mais cette loi est une approximation et la capacité C_p évolue de 0 à $3R$ selon la courbe suivante



On définit également une seconde caractéristique, T_D température de Debye, au-delà de laquelle on admet que l'approximation de Dulong et Petit devient applicable.

La température T_D est d'autant plus élevée que la température de fusion du solide est haute. Ainsi, pour les matériaux réfractaires fondant à très haute température, C_p est inférieure à $3R$.

Voici les valeurs de C_p et T_D à 25°C pour quelques éléments.

Élément	T_D	C_F	Élément	T_D	C_F
Li	400	20.7	Zn	234	25.4
Be	1000	21.8	Ge	360	26.0
B	1250	19.3	Zr	250	28.9
C(diam.)	1860	13.3	Mo	380	23.7
Na	150	28	Ag	215	23.8
Mg	318	24.6	Cd	120	25.9
Al	394	24.3	W	310	25.0
Si	625	24.7	Pt	230	25.9
Ti	400	25.1	Au	170	25.2
Cr	460	23.7	Hg	100	27.2
Fe	420	22.2	Pb	88	25.6
Ni	375	25.7	Bi	120	25.5
Cu	315	24.5	Th	100	26.3

Attention : de nombreux résultats techniques sont exprimés en J/kg/K.

En effet, il est fréquent d'apprécier le stockage d'énergie pour un volume ou une masse fixés.

Les résultats sont alors quelque peu différents...

La conductibilité thermique

Il s'agit ici de l'un des trois modes de transmission de la chaleur, le plus important dans les solides : la conduction (les autres sont la convection et le rayonnement).

La perception sensitive de cette propriété peut se faire en touchant à température ambiante un morceau de cuivre puis une pièce de bois. Le premier procure une impression de froid car la très grande conductibilité thermique du cuivre abaisse la température de la peau. Quant au bois, beaucoup plus « isolant », sa température superficielle s'adapte très vite à celle de la peau et l'échange de chaleur se fait à travers un gradient thermique notable.

Les applications de cette propriété sont industriellement très importantes. Elles permettent de définir, par exemple, des matériaux isolants pour réaliser des bâtiments dont les pertes d'énergie sont minimales ou bien encore ceux qui serviront à construire des échangeurs de chaleur efficaces.

Aspects macroscopiques de la conduction thermique.

S'il existe une différence de température aux extrémités d'un conducteur, il s'établit un flux de chaleur Q , analogue à un courant électrique sous l'effet d'une différence de potentiel.

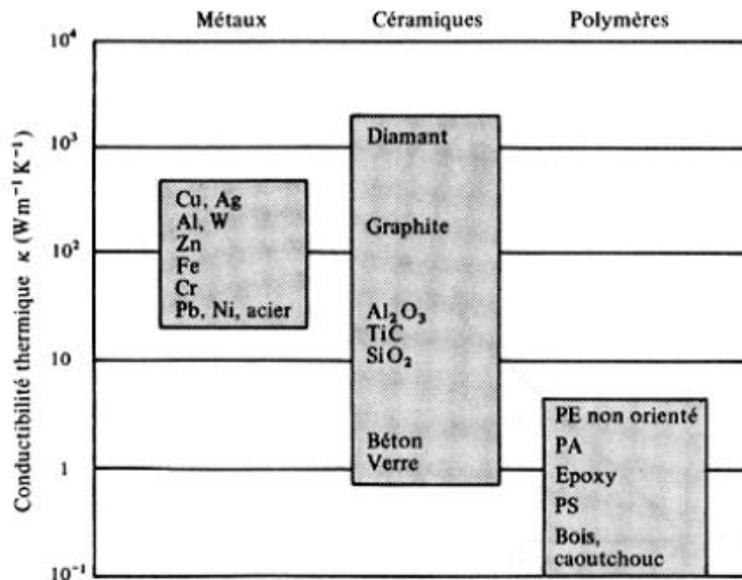
La première loi de Fourier décrit ce phénomène (elle ne s'applique qu'aux matériaux isotropes).

Elle permet de définir K , le coefficient de conductibilité thermique du matériau, qui relie le flux de chaleur Q , en W/m^2 , au gradient de température :

$$Q = -K \frac{dT}{dx}$$

Le coefficient K est exprimé en $W/m/K$.

Cette première loi, dite « en condition stationnaire », est complétée par une seconde pour des conditions dynamiques (où la température varie). Il s'agit d'une équation aux dérivées partielles dont l'interprétation et la mise en œuvre sortent du cadre de cet exposé.



Conductivité thermique

On voit ci-dessus comment varie la conductivité thermique à température ambiante, selon les trois classes de matériaux.

On peut observer de grandes analogies entre la conduction thermique et électrique : la plupart des métaux qui sont de très bons conducteurs électriques sont simultanément d'excellents conducteurs thermiques. Mais il existe quelques belles exceptions. Ainsi, l'isolant électrique idéal qu'est le diamant est meilleur conducteur thermique que l'argent !

Remarquons aussi que K varie seulement sur 4 ordres de grandeur selon les différents matériaux à l'état massif (infiniment moins que dans le cas de la conduction électrique). On gagne trois ordres de grandeur si on introduit les matériaux allégés (fibres, mousse, poudres).

Les mécanismes de la conduction thermique.

La chaleur se propage dans un solide par l'agitation thermique qui affecte :

- les électrons libres. On parle alors de conductivité thermique électronique, caractérisée par un coefficient K_e .
- le réseau cristallin sous l'effet des « phonons » qui sont des ondes de propagation de l'agitation thermique d'un atome à l'autre par l'intermédiaire des liaisons. Il s'agit dans ce cas de la conductivité thermique de réseau, avec la constante K_r .

Les deux phénomènes s'ajoutent et on peut donc écrire : $K = K_e + K_r$

En général, pour un matériau donné, l'un des deux termes est prépondérant et l'on peut classer les matériaux en conducteurs thermiques « par les électrons », comme c'est le cas des métaux et en conducteurs thermiques « par les liaisons (le réseau) » qui est plutôt le cas des céramiques et des polymères qui possèdent peu ou pas d'électrons libres. Cette conduction peut s'avérer très efficace puisque le carbone graphite est presque aussi bon conducteur thermique que l'aluminium.

Le meilleur cas pour la diffusion rapide de l'agitation thermique (conduction thermique élevée) est celui des matériaux cristallins qui possèdent un ordre parfait à très grande distance.

La conduction thermique sera donc diminuée dans les alliages. Les éléments d'addition, situés de place en place dans les sites du réseau cristallin, se comportent comme des centres de diffusion qui freinent les électrons libres aussi bien que les phonons en introduisant des discontinuités dans l'assemblage atomique.

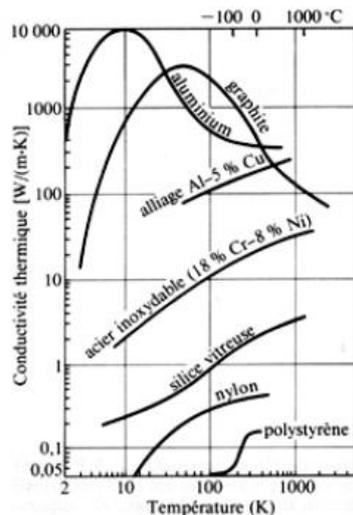
De même, les matériaux cristallisés à grain très fin sont moins bons conducteurs qu'une version monocristalline.

Enfin, les matériaux amorphes sont de moins bons conducteurs que les matériaux cristallisés car ils ne possèdent pas d'ordre à grande distance.

L'effet de la température sur la conduction thermique.

En partant des basses températures, la conduction thermique de tous les matériaux augmente avec la température du fait de l'augmentation de l'amplitude de l'agitation thermique, aussi bien celle des électrons que celle des atomes du réseau.

Au-delà d'une température critique, la conduction tend ensuite à décroître car le libre parcours moyen des électrons (et des phonons) diminue.



Les propriétés électriques

Pour pouvoir définir correctement le comportement électrique des solides et les propriétés qui en découlent, il faut faire le point sur certaines notions fondamentales de la physique.

Rappel sur la structure des solides

1- Nature de la matière : atomes et électrons.

1. La matière est constituée d'atomes qui comportent un centre chargé positivement, le noyau, autour duquel circulent des électrons liés au noyau par des énergies variables.

2. Selon les lois de la mécanique quantique, les électrons possèdent des énergies quantifiées, appelées niveaux d'énergie.

3. Les électrons circulent autour du noyau sur des orbitales correspondant à chaque niveau d'énergie. Chaque orbitale peut contenir au maximum deux électrons.

4. Si on augmente la charge du noyau (soit encore si on considère des éléments chimiques de plus en plus lourds), le nombre d'électrons augmente. Ceux-ci occupent alors les niveaux d'énergie libres et « remplissent » progressivement les orbitales.

La conductibilité électrique

Un conducteur électrique est un matériau qui possède des électrons mobiles, susceptibles d'entretenir un courant électrique dans la masse du matériau.

Sous l'effet d'une différence de potentiel V (en volts), un conducteur de résistance R (en ohms) est traversé par le courant I (en ampères) selon la loi d'Ohm :

Si la section du conducteur est S et sa longueur L , on peut calculer la résistance spécifique ρ , ou résistivité du matériau constituant le conducteur :

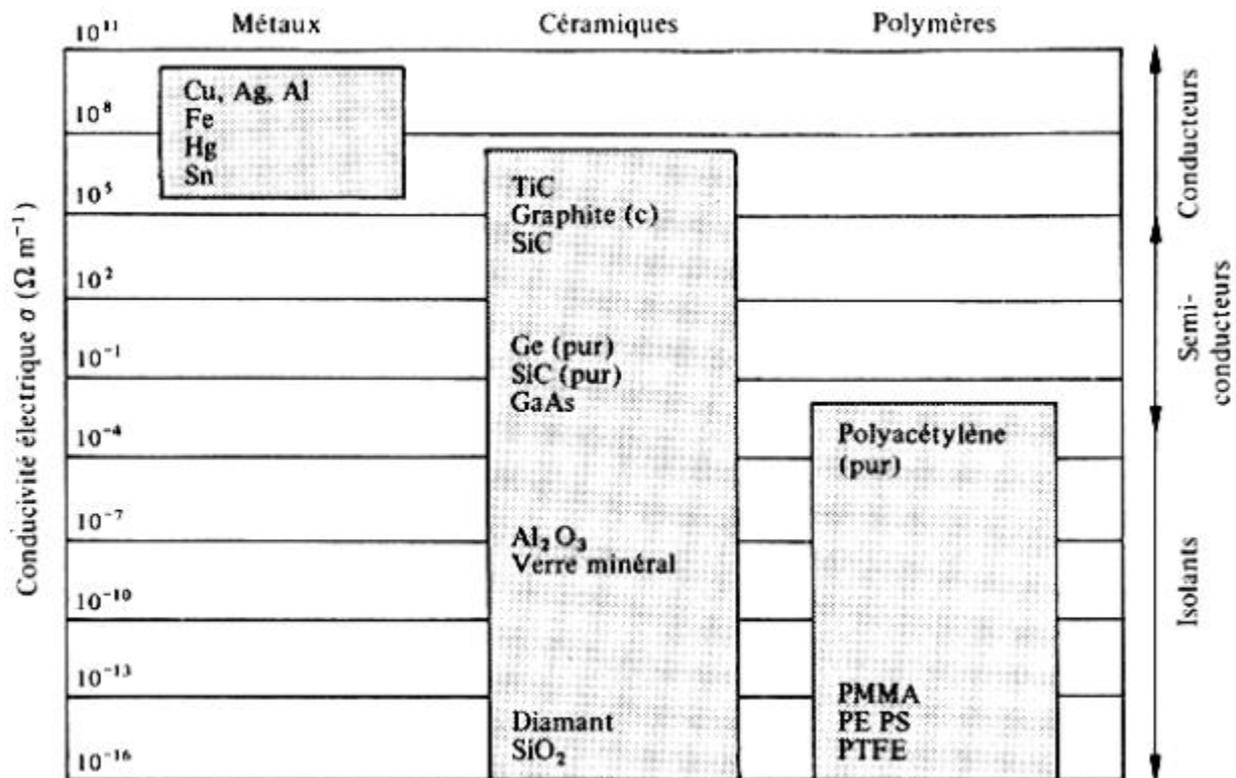
La résistivité ρ s'exprime en $\Omega \cdot m$.

$$\rho = \frac{R \cdot S}{L}$$

L'inverse de la résistivité, δ , est la conductivité électrique (parfois nommée aussi conductibilité électrique, à comparer avec le K de la conduction thermique).

La conductivité électrique des matériaux varie considérablement selon la nature des liaisons, la composition et la température.

A température ambiante, elle varie de $10^8 \Omega \cdot m$ pour un conducteur comme le cuivre à $10^{-16} \Omega \cdot m$ pour un isolant comme le PTFE (Téflon).



Conductivité électrique

La conduction électrique des métaux

Les métaux sont tous conducteurs du fait de leurs électrons libres très mobiles. Leur résistivité augmente avec la température du fait de l'augmentation de l'agitation thermique et du nombre de collisions croissant entre les électrons.

La résistivité varie linéairement selon :

$$\rho = \rho_0(1 + \beta(T - T_0))$$

où ρ_0 est la résistivité à T_0 et β le coefficient thermique.

Voici les résistivités et coefficients thermiques de quelques métaux :

	Résistivité à 20°C ($\Omega \cdot m$)	Coefficient thermique de résistivité ($^{\circ}C^{-1}$)
Aluminium	$2.7 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-3}$
Argent	$1.6 \cdot 10^{-8}$	$3.8 \cdot 10^{-3}$
Béryllium	$4 \cdot 10^{-8}$ à $10 \cdot 10^{-8}$	$25 \cdot 10^{-3}$
Chrome	$13 \cdot 10^{-8}$	$2.5 \cdot 10^{-3}$
Cuivre	$1.7 \cdot 10^{-8}$	$3.9 \cdot 10^{-3}$
Fer	$9.6 \cdot 10^{-8}$	$6.5 \cdot 10^{-3}$
Zinc	$5.8 \cdot 10^{-8}$	$4.1 \cdot 10^{-3}$

Comme dans les phénomènes thermiques, les alliages sont moins bons conducteurs que les métaux purs. De plus, de très faibles quantités d'impuretés modifient très rapidement la résistivité de nombreux métaux purs. Ceci provient de la perturbation du mouvement des électrons due à la présence des atomes étrangers, du fait de leur taille et structure électronique différentes.

La conduction électrique des semi-conducteurs

Les semi-conducteurs sont des matériaux qui appartiennent à la classe des céramiques du fait de la nature iono-covalente de leurs liaisons. Ils n'ont pas de différence apparente avec les isolants puisque dans les deux cas la bande de valence est complète et la bande de conduction est vide. Ils sont surtout constitués de métalloïdes et les plus importants actuellement sont le silicium, le germanium, l'arséniure de gallium (AsGa) et le phosphure d'indium (InP). Il en existe bien d'autres qui n'ont pas connu d'applications aussi larges que les précédents du fait de propriétés moins optimales.

Ce qui leur est particulier c'est la faible largeur de leur bande interdite qui permet à certains électrons de passer dans la bande de conduction par agitation thermique.

Ce sont donc de faibles conducteurs électriques, ce qui constitue un obstacle pour pas mal d'applications et, contrairement aux métaux, leur conductivité augmente avec la température (avec l'agitation thermique). On augmente cette conductivité en « dopant » le semi-conducteur de très faibles quantités d'éléments voisins de l'élément de base mais de valence différente.

Les isolants électriques

Les isolants possèdent une très faible conductivité électrique du fait de la grande largeur de leur bande interdite. Ce sont des matériaux à liaisons iono-covalentes dans lesquels les électrons de liaison sont fortement localisés.

Ces matériaux sont utilisés pour « isoler » des pièces conductrices et sont donc soumis à des champs électriques souvent intenses. Leur propriété de conserver leur pouvoir isolant dans de telles conditions est essentielle et se trouve principalement décrite par leur constante diélectrique ϵ .

Prenons le cas d'un condensateur constitué de deux plaques conductrices de surface S , séparées par la distance L .

Si on applique une différence de potentiel V entre ces plaques, l'une se charge positivement, l'autre négativement (dans la première, les électrons libres sont moins nombreux dans la bande de conduction, l'inverse pour la seconde). La quantité d'électricité supplémentaire contenue dans la plaque chargée négativement est Q , exprimée en coulombs.

On définit la capacité C du condensateur par l'expression bien connue :

$$C = \frac{Q}{V}$$

C s'exprime en farads (F) ou coulombs par volt.

Si l'espace entre les deux plaques est le vide, on peut relier la capacité aux dimensions L et S du condensateur par :

$$C = \epsilon_0 \frac{S}{L}$$

ϵ_0 est la permittivité électrique du vide, constante universelle = $8.854 \cdot 10^{-12}$ C/(V.m).

Si les plaques sont séparées par un matériau isolant, on peut écrire :

$$C = \epsilon \frac{S}{L}$$

où ϵ est la permittivité du diélectrique qui sera supérieure à ϵ_0 .

On préfère décrire le comportement du matériau par sa constante diélectrique ϵ_r ou permittivité électrique relative :

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

Cette grandeur, supérieure à 1, représente l'accroissement de charges procuré par la présence du diélectrique entre les deux plaques.

Le champ produit localement permet d'accumuler plus de charges sur la plaque négative par la déformation des liaisons dans le diélectrique.

Ce phénomène requiert un certain délai qui explique que l'effet diélectrique est variable si le champ électrique appliqué est alternatif et que ϵ_r dépend de la fréquence.

Les propriétés magnétiques

Notions de base sur le magnétisme

Les propriétés magnétiques des matériaux ont un rôle majeur dans des domaines comme les machines électriques (moteurs électriques, génératrices, transformateurs) et le stockage de l'information (bandes et pistes magnétiques, disques durs).

Sans entrer dans un exposé théorique trop important, nous décrirons ci-dessous les comportements magnétiques les plus fréquents des solides ainsi que le caractère exceptionnel des propriétés des matériaux tels que les aimants. Cependant les interprétations seront simplifiées car

V-I Origine atomique du comportement magnétique.

On peut assimiler la circulation des électrons sur les orbitales atomiques à un courant électrique tournant en boucle. Ce mouvement génère un moment magnétique perpendiculaire au plan de l'orbitale. De même, un électron qui tourne sur lui-même génère un moment magnétique, qui est toujours le même en intensité mais affecté d'un signe + ou – selon le sens de rotation.

Si toutes les couches électroniques d'un atome sont remplies, la somme de ces courants est nulle et cet atome n'aura aucun moment magnétique résultant. Il sera insensible à un champ magnétique externe et fera partie des matériaux diamagnétiques.

C'est le cas des gaz rares du carbone diamant ou du magnésium.

Seuls les atomes dont les couches sont incomplètes possèdent un moment magnétique.

Mais il faut considérer deux cas :

1. Les atomes comportant un seul électron sur la couche externe sont faiblement sensibles à un champ magnétique externe. Ils font partie des matériaux paramagnétiques. C'est le cas du sodium et des alcalins. D'autres atomes paramagnétiques possèdent un moment magnétique non nul mais il n'y a pas d'orientation globale possible car l'agitation thermique désorganise constamment l'alignement des dipôles (nombreuses céramiques). Tous ces matériaux (les plus nombreux) sont très intéressants pour construire des appareils insensibles aux champs externes.

2. A l'état solide, seuls les éléments ayant une couche interne incomplète auront une forte sensibilité à un champ magnétique externe. Ils constituent la famille des matériaux ferromagnétiques. Les dipôles atomiques s'alignent tous sur une grande distance dans le sens du champ externe et forment des domaines magnétiques à orientation commune. Cet « ordre interne » intense peut n'apparaître que si un champ externe les suscite et disparaître avec lui, ou bien subsister en l'absence de champ : il s'agit des aimants permanents, capables eux-mêmes de créer un champ magnétique autour d'eux.

L'effet ferromagnétique est détruit par l'agitation thermique et tous les matériaux ferromagnétiques possèdent une température limite dite température de Curie, au delà de laquelle ils deviennent paramagnétiques.

La plupart des matériaux ferromagnétiques sont rares. Citons le fer, le cobalt et le nickel, les plus importants, mais aussi les « terres rares », comme le terbium ou le samarium qui sont utilisés pour la fabrication d'aimants de très hautes performances.

Le ferrimagnétisme est un cas particulier de ferromagnétisme appliqué aux composés.

Le matériau étant constitué d'atomes différents, ceux-ci génèrent des moments magnétiques différents. Ces moments s'annulent en partie mais la résultante conduit à un comportement de type ferromagnétique.

C'est le cas de certains matériaux de grande importance technologique tels que les ferrites qui sont des mélanges d'oxydes de fer et d'autres métaux (Ni, Zn, Ba). Ils ont permis de fabriquer à partir de poudre des aimants d'efficacité moyenne mais très faciles à mettre en forme (« magnets »).

Induction magnétique, perméabilité et susceptibilité

Sous l'effet d'un champ magnétique extérieur H (créé par exemple par circulation d'un courant dans un solénoïde et exprimé en Am^{-1}) il se crée dans le vide un champ d'induction magnétique B_0 , capable de susciter un comportement magnétique dans un matériau.

B est exprimée en tesla (T) et est proportionnelle au champ H :

$$B_0 = \mu_0 H$$

μ_0 est la perméabilité magnétique du vide, en henry (H) par mètre ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{Hm}^{-1}$).

En présence de matière, on observe l'induction B et on peut définir μ , la perméabilité magnétique du milieu :

$$B = \mu H \quad (1)$$

On définit plus souvent la perméabilité relative μ_r du milieu:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$$

Une autre approche consiste à introduire M , aimantation, et à dire que l'induction B dans la matière peut aussi s'écrire :

$$B = \mu_0(H + M)$$

L'aimantation représente le champ magnétique local induit par le champ magnétique extérieur H . L'aimantation est donc proportionnelle à H .

On peut alors écrire : $M = X_r H$ et $B = \mu_0 H(1 + X_r)$

En comparant cette expression à (1) on trouve que :

$$\mu = \mu_0(1 + X_r)$$

X_r est la susceptibilité magnétique relative du matériau.

C'est une grandeur sans dimension, reliée à μ_r par : $\mu = 1 + X_r$

- Les matériaux diamagnétiques ont une susceptibilité négative très petite (environ -10^{-6}).

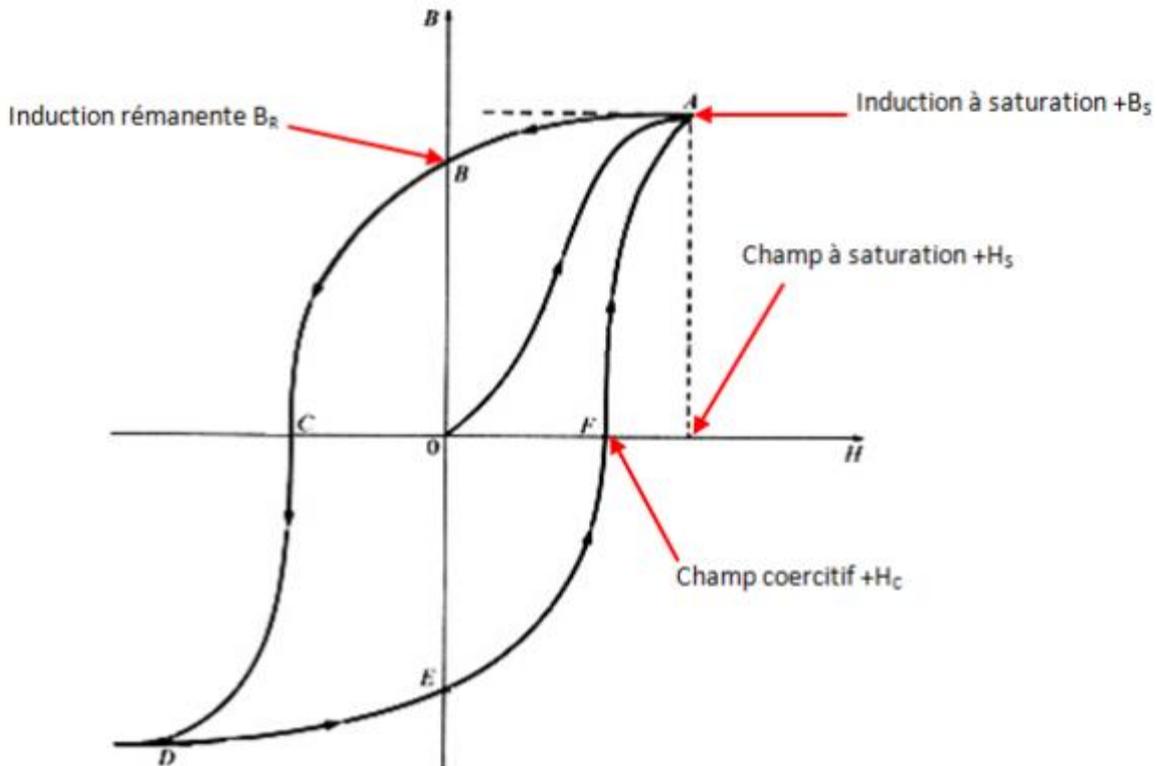
- Les matériaux paramagnétiques ont un X_r positif compris entre 10^{-6} et 10^{-3} .
- Les matériaux ferromagnétiques ont un X_r positif très grand, compris entre 10^3 à 10^6 .

Courbe d'aimantation, boucle d'hystérésis

La courbe suivante est la courbe d'aimantation d'un matériau ferromagnétique.

Elle est obtenue en mesurant l'induction B en fonction d'un champ externe « d'excitation » H , variant de 0 à $+H_s$, puis de $+H_s$ à $-H_s$ et enfin de $-H_s$ à $+H_s$.

B_s est l'aimantation à saturation du matériau, obtenue pour le champ extérieur H_s .



- En O (point de départ de la courbe), le matériau contient des domaines magnétiques dont l'orientation est globalement nulle.
- Le long de la partie OA de la courbe, le champ augmente jusqu'à la saturation. C'est la courbe de première aimantation. Les domaines évoluent vers un seul domaine de même orientation et la saturation est atteinte quand l'induction devient constante, B_s , pour le champ $+H_s$.
- Le champ décroît jusqu'à 0 quand on parcourt la courbe AB . Les domaines réapparaissent mais la réorganisation n'est pas complète et, au point B , pour $H = 0$ il subsiste une induction rémanente B_r .
- Il faut appliquer un champ de sens opposé pour annuler B_r . Ceci est atteint au point C pour la valeur du champ $-H_c$, dit champ coercitif.
- Lorsque le champ continue vers les valeurs négatives (courbe CD), on atteint la saturation inverse du point A pour la valeur $-H_s$. Un seul domaine magnétique s'est à nouveau formé mais il est orienté dans le sens contraire de celui qui existait en A .
- Si le champ évolue à nouveau vers les valeurs positives, on décrit la partie $DEFA$, symétrique par rapport à O de la courbe analysée.

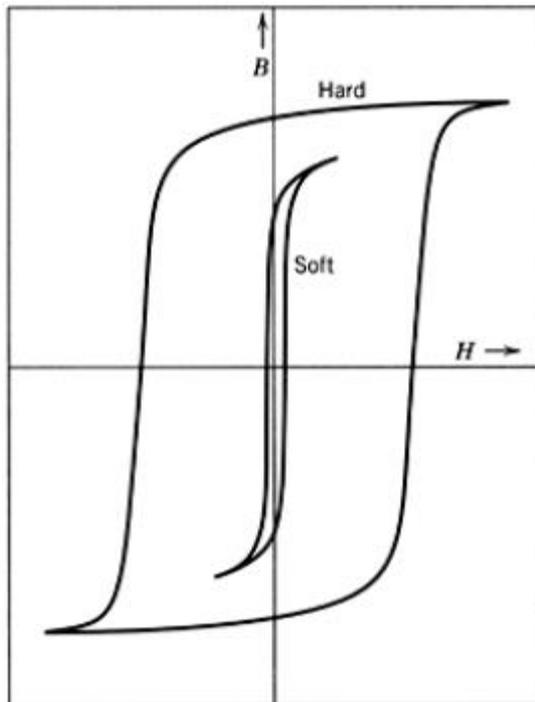
Cette courbe décrit la boucle d'hystérésis de l'aimantation, et permet de mesurer les paramètres caractéristiques du ferromagnétisme du matériau que sont B_s , B_r , H_s et H_c .

Dans le cas que nous venons de considérer, le matériau est devenu un aimant permanent, caractérisé par B_r .

L'aire de la boucle représente l'énergie dépensée pour réorienter les domaines magnétiques au cours du cycle. Cette énergie est dissipée sous forme de chaleur (pertes magnétiques). C'est surtout cette énergie qui fait chauffer la carcasse magnétique d'un transformateur fonctionnant à 50Hz.

La courbe précédente est celle des matériaux magnétiques durs, que sont les aimants.

Il existe la catégorie des matériaux magnétiques doux, dont la courbe d'hystérésis est très haute et très étroite. La courbe suivante compare la courbe d'aimantation de ces deux types de matériaux.



Ces matériaux sont destinés à produire une très forte induction sous l'effet d'un champ externe. Ils servent à « canaliser » les champs magnétiques dans de nombreux appareils électrotechniques (moteurs, transformateurs, blindages magnétiques, noyaux des électro-aimants) mais ne doivent pas conserver d'aimantation. Citons l'un des alliages spécialisés, le Mu-métal.