

Département de chimie

قسم الكيمياء

Polycopié Pédagogique

Propriétés des matériaux

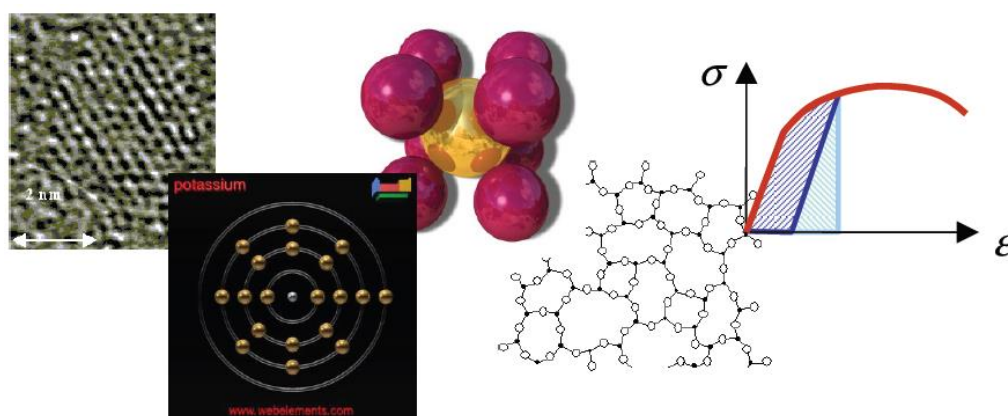
Cours & séries d'exercices, destinés aux étudiants de :

Licence : 3^{ème} année Chimie des Matériaux

Rédigé par :

Dr. OUALIT Mehena

Maître de conférences / A



Année Universitaire : 2023/2024

Avant-propos

Ce support pédagogique intitulé "Propriétés des Matériaux" cible principalement les étudiants en troisième année de licence, filière Chimie, spécialité Chimie des Matériaux. Cependant, il peut également être bénéfique pour d'autres spécialités telles que la science et le génie des matériaux, la physique des matériaux, etc. Le contenu de ce document pédagogique est aligné sur le programme de la matière (module), approuvé en 2018 par le Comité Pédagogique National du Domaine Science de la Matière (CPND-SM). Des séries d'exercices d'application sont également incluses pour chaque chapitre.

L'objectif principal de ce cours est de familiariser l'étudiant avec le domaine de la science des matériaux, en mettant particulièrement l'accent sur la relation entre la structure et les diverses propriétés des matériaux.

Outre le premier chapitre qui traite de la structure des matériaux, ce polycopié de cours aborde principalement :

- ✓ Les propriétés mécaniques des matériaux ;*
- ✓ Les propriétés thermiques ;*
- ✓ Et les propriétés électriques.*

Les propriétés des matériaux dépendent étroitement de leurs conditions d'élaboration, de transformation et d'utilisation. Pour des calculs précis, il est impératif de se baser exclusivement sur les caractéristiques et spécifications fournies et garanties par le fabricant du matériau utilisé, ou obtenues à l'aide d'essais spécifiques pour l'utilisation envisagée. Ainsi, les données présentées dans ce polycopié sont à titre indicatif et ne doivent pas être utilisées pour des calculs de dimensionnement précis.

Table des matières

Table des matières.....	2
I. Généralités sur la Structure des matériaux	6
I.1. Introduction.....	6
I.2. Définition : Qu'est-ce qu'un matériau ?.....	7
I.3. Rappel sur les grandes familles des matériaux	7
I.4. Propriétés des matériaux	8
I.4.1. Classification des propriétés des matériaux	8
I.5. Les liaisons chimiques	8
I.5.1. Liaisons fortes.....	9
I.5.1.1. Liaison covalente	9
I.5.1.2. Liaison ionique	11
I.5.2. Liaisons faibles	13
I.5.2.1. Liaison hydrogène.....	14
I.5.2.2. Liaison de Van Der Waals (VDW).....	14
I.6. Les solides cristallins	15
I.6.1. Notions de cristallographie.....	15
I.6.2. Propriétés structurales	16
I.6.3. Sites cristallographiques	17
I.6.4. Directions et plans cristallographiques	17
I.6.4.1. Directions réticulaires.....	17
I.6.4.2. Plans réticulaires	18
I.6.5. Systèmes et réseaux cristallins	19
I.6.6. Structures cristallines courantes.....	20
I.7. Les défauts cristallins.....	22
I.7.1. Défauts ponctuels.....	23
I.7.2. Défauts linéaires ou dislocations	24
I.7.3. Défauts surfaciques	25
I.7.4. Défauts volumiques.....	27
II. PROPRIETES MECANIQUES.....	29

II.1. Généralités	29
II.2. Comportement mécanique des matériaux	30
II.2.1. Notions de contraintes et déformations	30
II.2.2. Déformation élastique des matériaux	32
II.2.3. Déformation plastique	34
II.2.4. Energie de déformation : Ténacité	34
II.3. Essais mécaniques et propriétés des matériaux	35
II.3.1. Essai de traction uni-axiale	35
II.3.1.1. Courbe de traction conventionnelle	35
II.3.1.2. Courbe de traction rationnelle	37
II.3.2. Essais de dureté	37
II.3.2.1. Essai Brinell	37
II.3.2.2. Essai Vickers	38
II.3.2.3. Essai Rockwell	38
II.3.2.4. Autres essais de dureté	40
II.3.3. Autres essais mécaniques	40
II.3.3.1. Essai de compression	40
II.3.3.2. Essai de flexion	41
II.4. Classification des matériaux selon le comportement mécanique	41
III. PROPRIETES THERMIQUES	44
III.1. Introduction	44
III.2. Introduction aux échanges thermiques	44
III.3. Capacité thermique	45
III.3.1. Capacité thermique à volume constant (C_v)	45
III.3.2. Capacité thermique à pression constante (C_p)	46
III.3.3. Chaleur massique des solides et liquides	46
III.3.4. Chaleur massique d'un gaz	46
III.4. Effet de la température	47
III.5. La dilatation thermique	48
III.5.1. Dilatation thermique des solides	49

III.5.2. Dilatation thermique des liquides	50
III.6. La conductibilité thermique.....	52
III.7. Modes de transfert de chaleur	52
IV. LES PROPRIETES ELECTRIQUES.....	56
IV.1. Introduction	56
IV.2. Notions de base.....	56
IV.2.1. Théorie des bandes	57
IV.3. Résistivité et conductivité électriques.....	59
IV.3.1. La conduction électrique des métaux	60
IV.4. Permittivité électrique	61
IV.5. Ferroélectricité et piézoélectricité.....	61
IV.6. Concept de la masse effective	64
Série d'exercices d'application	66
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	77

CHAPITRE I
GENERALITES SUR LA STRUCTURE DES
MATERIAUX

I. Généralités sur la Structure des matériaux

I.1. Introduction

Les matériaux ont de tout temps défini le niveau de développement de notre civilisation. Aujourd'hui, ils jouent un rôle important dans tous les développements technologiques. Pour l'ingénieur, il est impossible de concevoir ou fabriquer de nouveaux produits sans savoir et tenir compte des différentes **propriétés des matériaux** qu'il utilise. Le comportement des matériaux et les méthodes de leur transformation ainsi que leur compatibilité avec l'environnement limitent leur application dans un domaine ou un autre.

La maîtrise de nouveaux matériaux a été à l'origine des révolutions dans l'histoire de technologies inventées. 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 croissance. En effet, la science des matériaux permet de concevoir de nouveaux matériaux adaptés à chaque nouvelle application. On pourra distinguer deux grandes catégories de matériaux :

- **Les matériaux de structure**, sont utilisés essentiellement pour leurs capacités à soutenir des sollicitations mécaniques et/ou thermiques.
- **Les matériaux fonctionnels**, qu'on utilise pour leurs propriétés physiques, telles que conductivité ou semi-conductivité électrique, magnétisme, propriétés optiques ...etc

Les objets qui nous entourent, que nous manipulons quotidiennement, sont tous constitués d'une matière choisie pour sa bonne adaptation à la fonction de l'objet en question et au procédé utilisé pour conférer à l'objet la forme souhaitée. La notion de **matériau** est donc rigoureusement indissociable de l'intérêt que peut présenter la substance en question pour l'obtention d'un objet fini (Figure I.1).

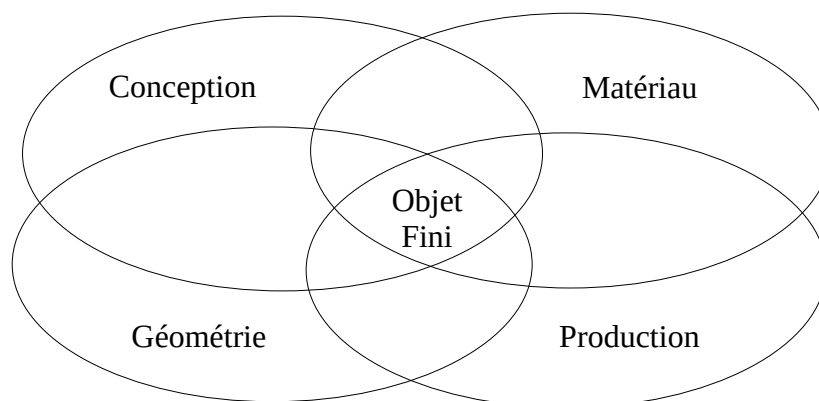


Figure I.1 Interactions présidant à la réalisation d'un objet fini

I.2. Définition : Qu'est-ce qu'un matériau ?

De manière symbolique et résumée, un **matériau** est une **matière** dont on fait un **matériel**. De manière plus précise et plus complète : un matériau est la forme marchande d'une matière première choisie en raison de propriétés d'usage spécifiques et mise en œuvre par des techniques appropriées pour l'obtention d'un objet de géométrie donnée à fonction préméditée.

Généralement, le terme *matériau* indique un solide utilisé par l'homme pour la fabrication d'objets.

Exclus : gaz, liquides, matières énergétiques (charbon, combustibles nucléaires, ...).

La structure d'un matériau correspond à la façon dont s'agencent ses éléments constitutifs ; on peut distinguer plusieurs échelles :

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

I.3. Rappel sur les grandes familles des matériaux

Un matériau est une matière d'origine naturelle ou artificielle que l'homme façonne pour en faire des objets. Selon le critère de classification, on distingue quatre grandes familles de matériaux.

- **Les matériaux métalliques.** Ce sont des métaux ou des alliages de métaux. (Fer, acier, aluminium, cuivre, bronze, fonte, etc.)
- **Les matériaux organiques.** Ce sont des matériaux d'origine animale, végétale ou synthétiques. (Bois, coton, laine, papier, carton, matière plastique, le caoutchouc, le cuir, etc.)
- **Les matériaux minéraux.** Ce sont des roches, des céramiques ou des verres. (Céramique, porcelaine, pierre, plâtre, verre, etc.)
- **Les matériaux composites :** Ce sont des assemblages d'au moins deux matériaux non miscibles (fibres de verre, fibres de carbone, contreplaqué, béton, béton armé, kevlar, etc.) Les membres de la même famille ont des traits communs : propriétés, méthodes de mise en œuvre et souvent applications.

Les matériaux ont de tout temps défini le niveau de développement des civilisations. Aujourd'hui, ils jouent un rôle important dans tous les développements technologiques. Pour l'ingénieur, il est impossible de concevoir ou fabriquer de nouveaux produits sans savoir et tenir compte des différentes **propriétés des matériaux** qu'il utilise. Le comportement des matériaux et les méthodes de leur transformation ainsi leur compatibilité avec l'environnement qui limitent leur application dans un domaine ou un autre. Les propriétés des matériaux sont liées à la nature des liaisons chimiques, l'arrangement structural et la microstructure. L'utilisation des matériaux dépend aussi de leur disponibilité, de leur coût, de leurs méthodes de synthèse et de fabrication.

I.4. Propriétés des matériaux

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

- Leur **composition chimique** (*nature* des espèces atomiques qui les constituent) ;
- Leur **microstructure** (*organisation* des atomes constitutifs).

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... etc

I.4.1. Classification des propriétés des matériaux

Comme illustré dans la figure I.2, les propriétés des matériaux peuvent être classées :

- **Les propriétés mécaniques** : qui reflètent le comportement des matériaux lorsqu'ils sont sollicités par des efforts extérieurs.
- **Les propriétés physiques** : qui représentent le comportement des matériaux sous l'action de la température, des champs électriques ou magnétiques ou de la lumière. On distingue les propriétés thermiques ; électriques, magnétiques et optiques.
- **Les propriétés chimiques** : qui caractérisent le comportement des matériaux dans un environnement réactif.

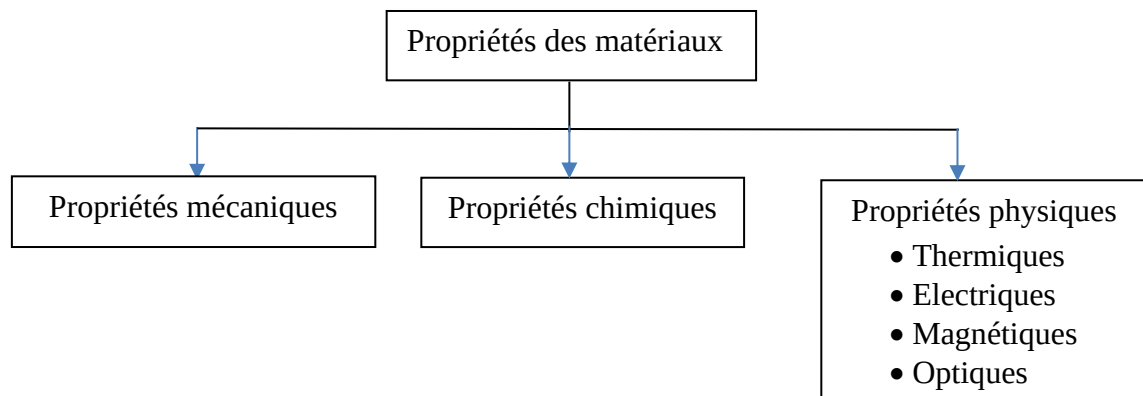


Figure I.2. Classification des propriétés des matériaux

I.5. Les liaisons chimiques

La formation d'ensembles polyatomiques stables appelés molécules implique que les atomes s'unissent pour former des entités plus stables. La liaison chimique est un concept qui permet d'expliquer la **cohésion de la matière** et par conséquent une influence directe sur les **propriétés des matériaux**.

Les liaisons chimiques sont dues aux propriétés des atomes. En effet, les électrons qui forment des nuages électroniques autour des noyaux tendent à acquérir une énergie minimale. Cette énergie pour deux atomes peut être diminuée lorsqu'ils interagissent entre eux et forment une liaison chimique. Une liaison chimique est donc une forme d'énergie qui retient les atomes entre eux pour former des molécules. Former une liaison exige de l'énergie alors que détruire une liaison libère une certaine quantité d'énergie.

Classées en liaisons fortes et liaisons faibles, et ce, en fonction de l'énergie de liaison qui permet de mesurer « la force » de la liaison

$$(\text{Energie de liaison} = - \text{Energie de dissociation})$$

I.5.1. Liaisons fortes

Ce type de liaisons nécessite une énergie de dissociation de l'ordre de 200 à 500 kJ.mol⁻¹ pour briser les liaisons interatomiques :

- On peut distinguer trois (3) types limites de liaisons fortes :

- a) Liaison covalente : se forme entre atomes d'électronégativités voisines ;
- b) Liaison ionique : se forme entre atomes d'électronégativités très différentes ;
- c) Liaison métallique : se forme entre atomes d'électronégativités voisines, elle est assurée par un nombre d'électron inférieur à une paire - beaucoup plus faible que les 2 autres.

Ce sont des types de liaison limites : de nombreuses liaisons sont des cas intermédiaires entre ces 3 types limites.

I.5.1.1. 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. Elle apparaît entre deux atomes de non-métaux (liaison assurée par des électrons de la bande de valence).

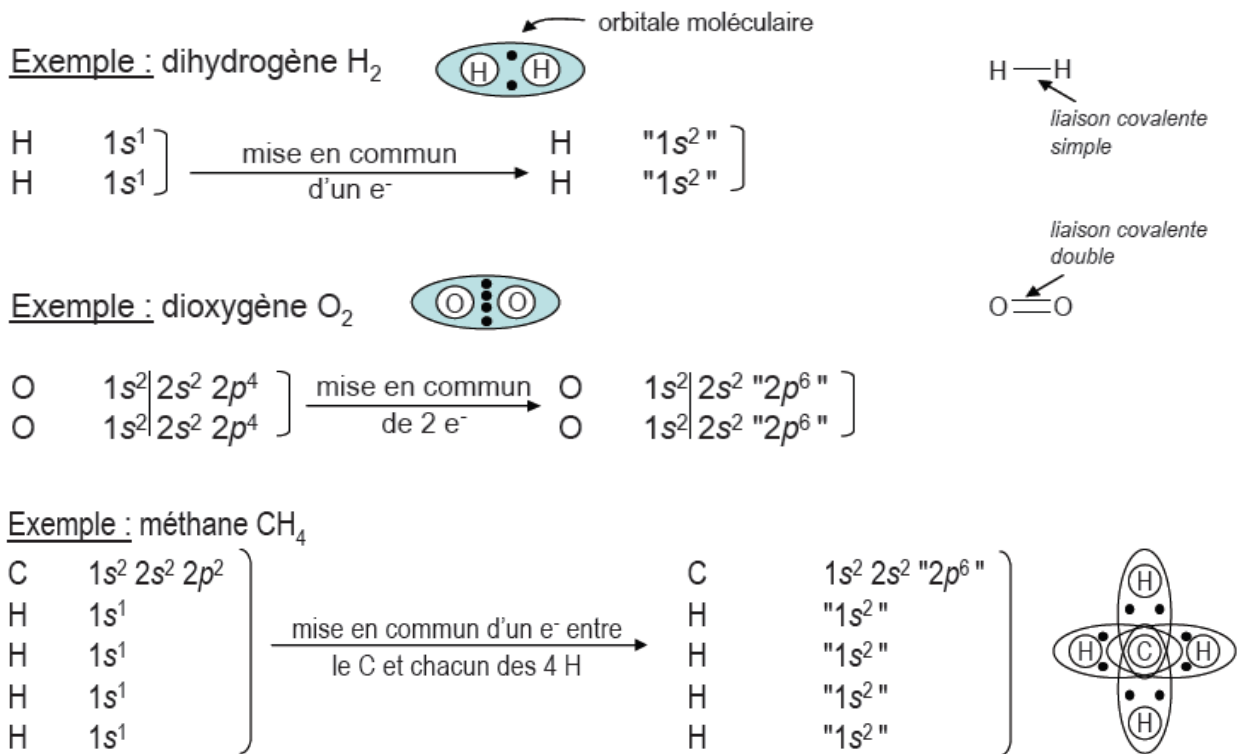
Les liaisons covalentes sont dirigées, ce qui induit de fortes contraintes géométriques sur les empilements atomiques.

Dans les liaisons covalentes les atomes "*mettent en commun*" des électrons de leur couche électronique la plus externe. Ces électrons forment alors un nuage électronique qui englobe les deux atomes. Ces liaisons ont une longueur et une énergie bien déterminée.

Chaque atome ne peut faire qu'un nombre déterminé de liaisons covalentes. Il possède une capacité de liaison, c'est-à-dire qu'il doit former un certain nombre de liaisons covalentes pour compléter son dernier niveau énergétique :

- L'atome d'hydrogène peut en faire une ;
- L'oxygène deux (parfois trois dans certaines conditions) qui peuvent être deux liaisons simples ou une double liaison ;
- Le carbone peut en faire quatre. (Quatre simples ou deux doubles ou une double et deux simples ou une triple et une simple.

Voici par ailleurs, quelques exemples où la de liaison covalente est mise en évidence :



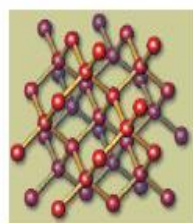
On peut déterminer si une liaison est covalente polaire ou covalente non polaire en calculant l'électronégativité.

L'électronégativité est une mesure de la force d'attraction pour attirer les électrons dans une liaison chimique. Chaque élément possède une électronégativité spécifique.

Quand deux atomes ont des électronégativités identiques, comme dans l'oxygène diatomique, le doublet d'électrons liants est partagé également entre eux dans une liaison covalente. (Non polaire) tandis que s'il y a une différence entre les électronégativités, la liaison est polaire.

Un solide dont la cohésion est due à la liaison covalente est appelé solide covalent. Généralement, ils sont des matériaux résistants, fragiles, isolants et ayant une température de fusion élevée.

Exemple :



atome de carbone

chaque atome de C
est lié à 4 autres formant un
tétraèdre autour de lui



I.5.1.2. Liaison ionique

Elle est assurée par le transfert d'un électron d'un atome à l'autre. Elle apparaît entre un atome d'un métal et un atome d'un non-métal. Après leur liaison, les deux atomes deviennent des ions chargés électriquement.

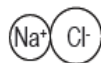
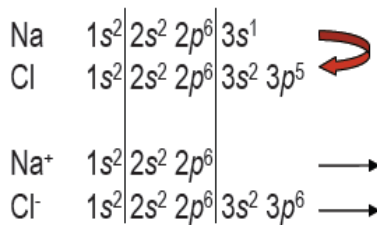
Il s'agit d'une attraction électrostatique entre deux ions d'électronégativités très différentes (par exemple, entre un halogène et un alcalin : cas classique de NaCl) après transfert d'un électron de valence. La densité électronique s'annule entre les deux ions qui sont donc nettement séparés. La liaison ionique est forte et non dirigée. L'empilement des atomes est régi par une compacité maximale et l'obtention de la neutralité électrique dans un volume le plus faible possible. Parmi les solides ioniques on peut citer entre autres les halogénures d'alcalins et les oxydes comme l'alumine Al_2O_3 , la magnésie MgO et la zircone ZrO_2 .

Dans les liaisons ioniques, ce sont des ions qui interagissent. Les atomes ont cédé ou capté un (1) ou plusieurs électrons et sont donc chargés électriquement (ions). Il y a donc transfert d'électrons entre les atomes.

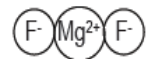
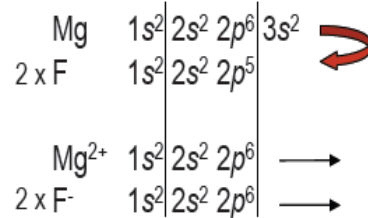
Par exemple, le sel de cuisine (NaCl). Quand le sodium (Na) réagit avec le chlore (gaz de dichlore, Cl_2), les atomes de sodium perdent un électron et les atomes de chlore gagnent un électron (la molécule de dichlore est d'abord dissociée).

Les ions se combinent dans un rapport 1:1 pour former le sel de cuisine. Les composés ioniques portent le nom de sel.

Exemple : sel de cuisine NaCl

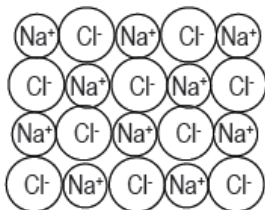


Exemple : MgF_2



Les sels ne possèdent pas tous un nombre égal de cations et d'anions.

Les solides dont la cohésion est assurée par la liaison ionique sont appelés solides ioniques (voir Figure I.3), ils sont neutres avec un rapport fixé entre le nombre de cations (Ex : Na^+) et le nombre d'anions (Ex : Cl^-)



Sel (NaCl)



Cristal de fluorure de lithium (LiF)

Figure I.3. Exemples de matériaux contenant des liaisons ioniques

En fait, peu de liaisons sont purement ioniques ou purement covalentes, les céramiques sont presque toujours **iono-covalentes**.



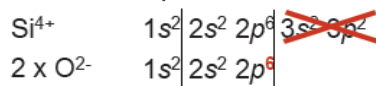
Exemple de la silice SiO_2

silicium	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$	→ 4 électrons de valence
2 x oxygène	$1s^2 2s^2 2p^4$	→ 6 électrons de valence



2 possibilités → laquelle est sélectionnée ?

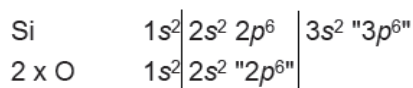
liaison ionique



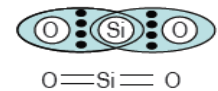
8 e⁻ sur la 2^e couche
8 e⁻ sur la 2^e couche



liaison covalente



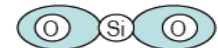
8 e⁻ sur la 3^e couche
8 e⁻ sur la 2^e couche



En réalité : entre les deux =



En fait, peu de liaisons sont purement ioniques ou purement covalentes, les **céramiques** sont presque toujours **iono-covalentes**



a) Liaison métallique

Dans les métaux, les électrons de valence (couche externe) sont très peu nombreux et sont très faiblement liés au noyau de l'atome métallique. Les électrons de valence sont délocalisés et réparties dans l'ensemble du métal.

La liaison métallique est caractérisée par une structure d'ions positifs noyés dans un gaz d'électrons. Ce type de liaison favorise la création de structures cristallines simple de grandes symétries et **très compactes**. La mobilité des électrons permet d'expliquer la **conductivité électrique et thermique** élevée des métaux.

Les éléments métalliques s'ionisant facilement (1 à 3 électrons sur la couche externe, faiblement liés au noyau), la mise en commun d'un (1) ou de plusieurs électrons dans un nuage « **délocalisé** », forme la liaison métallique. Les métaux sont donc un assemblage d'ions positifs dans un « gaz d'électrons » qui assure leurs conductivités électrique et thermique élevées, ainsi que l'éclat métallique (interactions entre électrons et photons) et les propriétés mécaniques (plasticité). La liaison métallique « pure » ne se rencontre que pour les métaux normaux (alcalins, alcalino-terreux, Al...) où elle est assez faible. Pour les métaux de transition, les ions sont beaucoup plus rapprochés et l'interaction entre les sous-couches incomplètes crée une composante covalente, qui renforce la liaison parfois de manière considérable. La liaison métallique n'est pas dirigée et conduit à des assemblages compacts, souvent à symétrie élevée.

1. S'établit entre atomes d'électronégativités faibles et possédantes peu d'électrons sur leur couche externe (1, 2 ou 3 électrons) ;
2. Mise en commun d'électrons non pas sur 2 atomes mais sur un nombre illimité d'atomes :

Phénomène de délocalisation des électrons dans tout l'échantillon les atomes métalliques perdent, dans l'établissement de la liaison, l'influence sur leurs électrons externes : ils deviennent donc des ions positifs dont les positions, si le métal est solide, sont fixes les unes par rapport aux autres.

3. Non dirigée dans l'espace.

Modèle de la liaison métallique

- Les atomes métalliques perdent, dans l'établissement de la liaison, l'influence sur leurs électrons externes : ils deviennent donc des ions positifs dont les positions, si le métal est solide, sont fixes les unes par rapport aux autres.
- Les électrons externes sont délocalisés et se comportent comme s'ils étaient libres, tout en restant dans l'échantillon.

Comme illustré sur la figure I.4, un métal peut être décrit comme un assemblage d'ions positifs baignant dans un nuage (ou mer) électronique faible et dont les électrons sont facilement mobiles, d'où la grande conductibilité électrique des métaux.

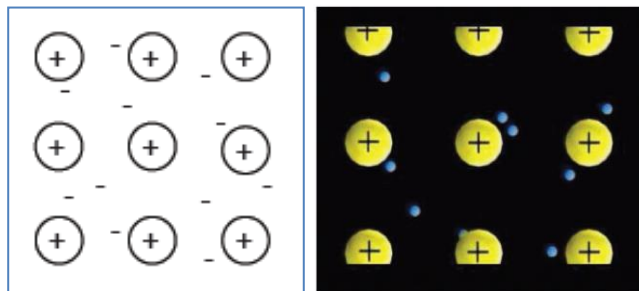


Figure I.4 : Mise en évidence de la liaison métallique

Les métaux sont connus pour leur conductibilité thermique qui est très importante. Si le métal est chauffé en un point, la délocalisation des électrons permet un transfert de l'énergie thermique par leur agitation. D'où une propagation de la chaleur dans tout le métal provoquant ainsi une élévation de la température du solide dans sa totalité.

Les métaux sont aussi de bons conducteurs électriques. Sous l'effet d'un champ électrique, même faible, on assiste au passage d'un courant. Ceci est lié à la facilité qu'ont les électrons à se déplacer dans le solide.

I.5.2. Liaisons faibles

Les liaisons dites faibles sont des liaisons secondaires. Elles n'induisent qu'un changement minime de la position des électrons. Les forces de liaisons secondaires résultent surtout d'interactions électrostatiques entre dipôles électriques. Les liaisons secondaires (faibles) ont une

influence déterminante sur les **propriétés physiques et mécaniques** des polymères organiques. Les liaisons faibles ont des énergies de dissociation inférieures à 50 kJ.mol^{-1} .

I.5.2.1. Liaison hydrogène

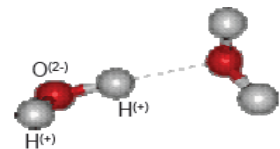
La liaison hydrogène vient d'une résonance entre deux positions d'un proton entre deux anions voisins fortement électronégatifs (O^{2-} , F^-), elle a donc un caractère ionique marqué. On la retrouve dans l'eau, la glace, les sels hydratés, les polymères organiques (acides...) et inorganiques (notamment les liants hydrauliques tels que les ciments).

- Elle se produit lorsqu'un atome électronégatif (avec un ou plusieurs doublets libres) se trouve à proximité d'un atome d'hydrogène lié de façon covalente à un autre atome électronégatif.
- C'est une liaison dirigée dans l'espace.
- On distingue la liaison H intramoléculaire et intermoléculaire.

Exemples :

liaison entre dipôles permanents (molécules polaires)

- 10 x plus faible qu'une liaison covalente
- ex : liaison hydrogène, assurant la cohésion de l'eau et de la glace



I.5.2.2. Liaison de Van Der Waals (VDW)

C'est une liaison faible, qui est due à l'attraction électrostatique entre doublets électrons-noyau des molécules. On la trouve dans les polymères organiques, la cristallisation des gaz rares à très basse température, entre les feuillets silicatés des argiles et entre les feuillets de graphite. C'est une liaison entre dipôles. Elle est cent fois environ plus faible qu'une liaison covalente.

On distingue 3 types d'interactions de Van Der Waals (VDW)

- Attraction entre les dipôles permanents dans les molécules polaires (interactions de Keesom).
- Attraction entre les dipôles permanents (molécules polaires) et les dipôles induits dans des molécules non polaires (induits par les dipôles permanents des molécules polaires), (Interactions de Debye).
- Attraction entre molécules non polaires, due à la polarisabilité des molécules ou des atomes : interaction la plus fondamentale des 3 puisqu'elle existe toujours, (Interactions de London).

Les tableaux I.1 et I.2 mettent en évidence le lien entre quelques propriétés des matériaux et le type de liaison chimique.

Tableau I.1. Conséquence des liaisons sur les propriétés des matériaux

Type de liaison	Propriétés				
	Température de fusion (T_f)	Module d'élasticité (E)	Coefficient de dilatation (α)	Conductivité électrique (σ)	Ductilité
Covalente	Elevé	Elevé	Faible	Faible	Faible
Ionique	Elevé	Elevé	Faible	Faible	Faible
Métallique	Moy-Elevé	Moy-Elevé	Moy-Faible	Moy-elevé	Elevé
V. D. Waals	Faible	Faible	Elevé	Faible	Moy-Faible

Tableau I.2. Valeurs numériques des propriétés des matériaux selon le type de liaison

Liaison	Exemple	T_f (°C)	E (GPa)	α ($10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
Covalente	TiC	3180	315	7.4
Ionique	SiO ₂	1600	72	0.5
Métallique	Mo	1535	210	11.8
V. D. Waals	Polyéthylène	115	0.2	210

I.6. Les solides cristallins

Un **cristal** est un ensemble d'atomes (ou de molécules) disposés de manière périodique dans les trois directions et présentant ainsi un ordre à courte distance et à longue distance.

I.6.1. Notions de cristallographie

La cristallographie décrit l'architecture des cristaux, c'est-à-dire la répartition des atomes dans l'espace et les lois géométriques qui en fixent la position. Les solides cristallins sont donc caractérisés par un ensemble d'atomes arrangés périodiquement suivant les trois directions de l'espace dans un ordre strict qui définit la structure cristalline.

Deux concepts fondamentaux sont à la base de la description de la structure cristalline : le réseau et le motif.

Un **réseau** spatial est constitué par un ensemble de points appelés nœuds, de dimension infinie, obtenu par translation dans l'espace de trois vecteurs non coplanaires, a , b et c , qui déterminent les directions et les distances entre les nœuds du réseau. Dans le cristal, chaque nœud du réseau possède un environnement identique pour une direction donnée (voir Figure I.5).

Le **motif** constitue l'élément de base dont la répétition suivant le réseau spatial engendre le cristal. Le motif peut être un atome ou un groupe d'atomes ayant une orientation et une géométrie bien déterminées.

La **maille** contient le motif d'atomes qui se répète. Les mailles ont un volume de forme géométrique simple (cube, parallélépipède) dont la répartition dans l'espace engendre le réseau et le cristal. Le module des trois vecteurs a , b et c qui forment les arêtes de la maille sont appelés **paramètres de la maille**.

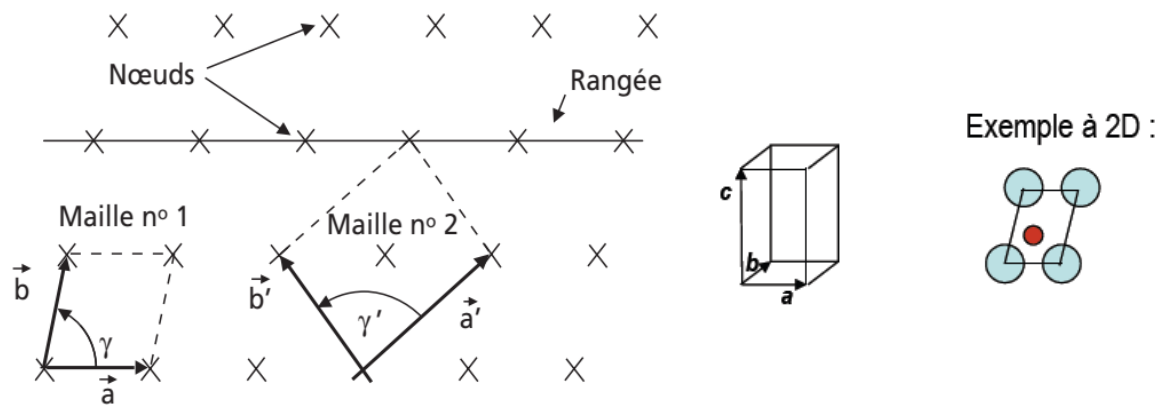
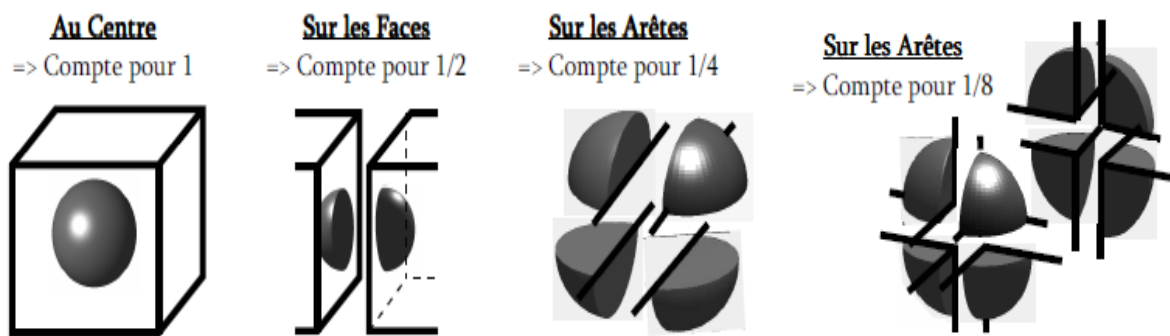


Figure I.5. Schéma d'un réseau à deux dimensions. La maille n° 1 est un exemple de maille élémentaire (un nœud par maille) ; la maille n° 2 est un exemple de maille multiple.

Multiplicité : Nombre de sphères appartenant à la maille élémentaire (Certaines sont partagées). On distingue 4 cas possibles :



I.6.2. Propriétés structurales

Considérons un modèle des sphères dures indéformables => Chaque motif du cristal est représenté par une sphère dure.

Compacité C : Rapport du volume réellement occupé par les sphères sur le volume total de la maille

$$C = \frac{\text{Volume des atomes dans la maille}}{\text{Volume total de la maille}} \dots\dots\dots (I.1)$$

Masse Volumique ρ :

$$\rho = \frac{\text{Masse des entités de la maille}}{\text{Volume de la maille}} = \frac{Z \times M_a}{N.V} \dots\dots\dots (I.2)$$

Z : Nombre d'atomes par maille ;

M_a : Masse molaire;

N : Nombre d'Avogadro ($6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

V : Volume totale de la maille.

I.6.3. Sites cristallographiques

Tout réseau cristallin, constitué de sphères identiques de rayon R comporte nécessairement des portions d'espaces inoccupées, puisque $C < 1$. Celles-ci portent le nom de sites cristallographiques. Ces sites peuvent être occupés par des espèces différentes. On distingue 3 types de sites, comme illustré dans la figure I.6.

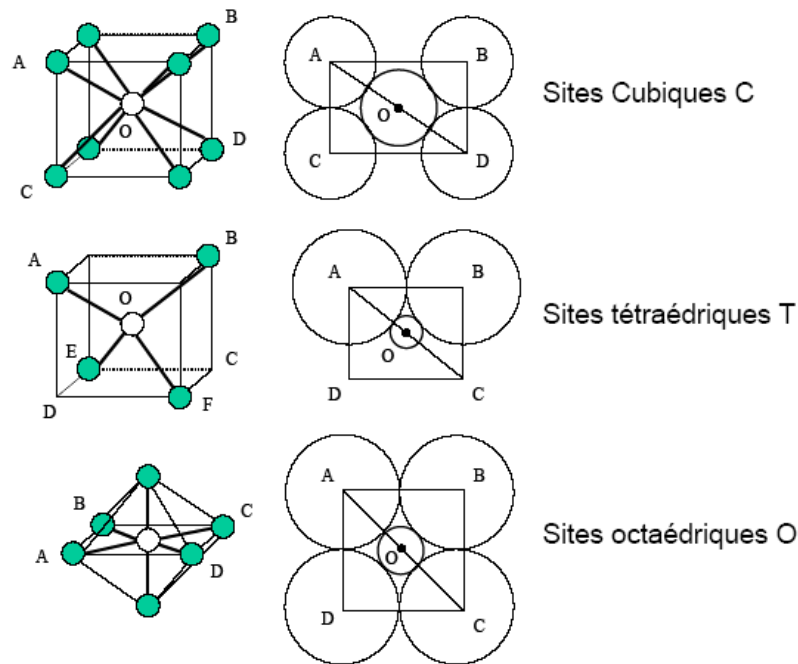


Figure.I.6. : Les sites cristallographiques de base

I.6.4. Directions et plans cristallographiques

Compte tenu du caractère périodique de leur disposition, les atomes peuvent être regroupés selon une infinité de familles de rangées atomiques ou de familles de plans atomiques parallèles. Dans un cristal parfait, une famille donnée (de rangées ou de plans) contient tous les atomes du cristal ; réciproquement, par un atome donné passe un représentant de toutes les familles de rangées et de plans du cristal.

Plan réticulaire : Plan passant par 3 nœuds du réseau au moins ou cristallographique.

Rangée réticulaire : Droite passant par 2 nœuds du réseau au moins.

I.6.4.1. Directions réticulaires

Une direction est désignée par trois indices $[u \ v \ w]$ qui signifie une droite partant de l'origine et passant par l'atome de coordonnées u , v et w . Une famille de direction est désignée par $\langle u \ v \ w \rangle$. Avec u , v , w des entiers, (voir Figure I.7).

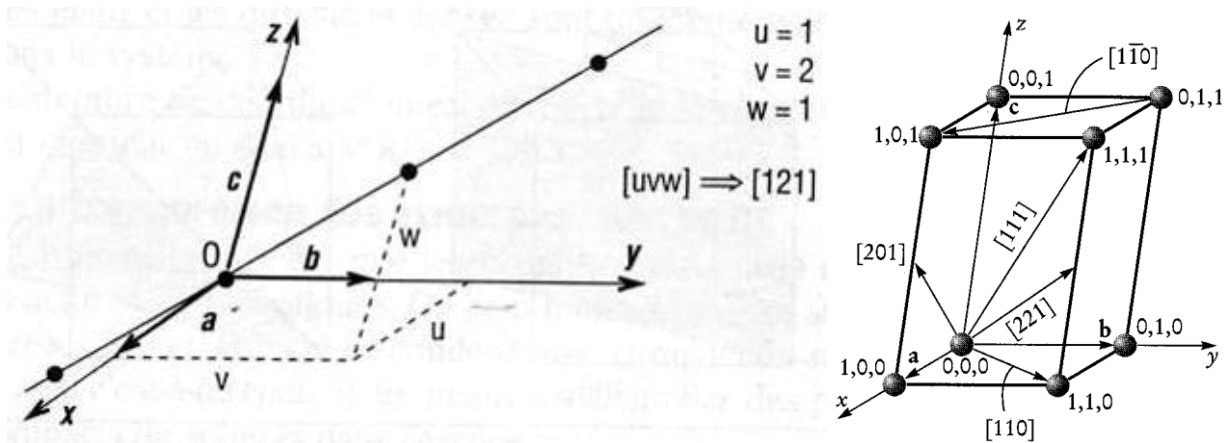


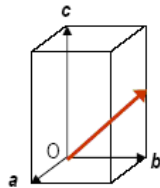
Figure I.7. Repérages des architectures atomiques et les directions réticulaires

Méthodologie pour désigner une direction

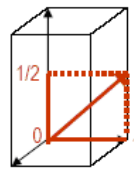
- 1) Tracer dans la maille élémentaire un vecteur parallèle à la direction et passant par l'origine ;
- 2) Projeter le vecteur sur les axes et exprimer ses coordonnées dans la base (a, b, c) ;
- 3) Ramener ces coordonnées à des valeurs entières, les plus petits possibles ;
- 4) Noter la direction de la façon suivante : [uvw] (**indices de Miller de la direction**).

Exemple :

1)

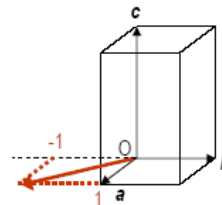


2)



3) 0, 2, 1

4) [021]



I.6.4.2. Plans réticulaires

Un plan réticulaire est désigné par trois indices de Miller (h k l). En effet, un plan qui coupe les axes Ox, Oy, Oz en M, N, P est défini comme les plus petits entiers proportionnels à $1/m$, $1/n$ et $1/p$.

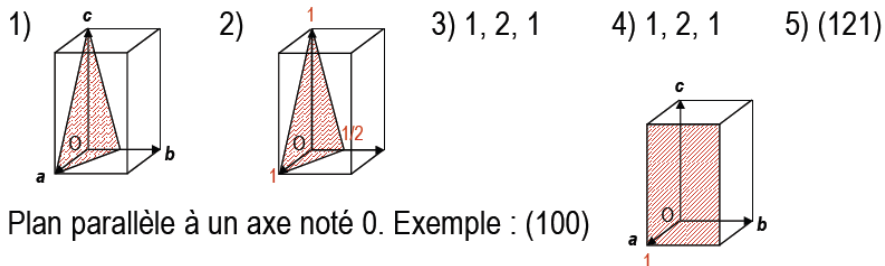
Méthodologie pour désigner un plan réticulaire :

- 1) Dessiner un plan dans la maille élémentaire qui ne passe pas par l'origine ;
- 2) Exprimer les coordonnées des points d'intersection du plan avec les 3 axes dans la base (a, b, c) ;
- 3) Prendre l'inverse de ces coordonnées (uniquement pour les plans) ;
- 4) Ramener ces coordonnées à des valeurs entières, les plus petits possibles ;
- 5) Noter le plan de la façon suivante (hkl) (**indices de Miller du plan**)

Distance inter-réticulaire : est la distance entre les plans de la famille (hkl). Pour le système cubique, cette distance est décrite par la relation (I.3) :

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \dots\dots\dots (I.3)$$

Exemple :



I.6.5. Systèmes et réseaux cristallins

Il existe sept systèmes cristallins différents. En plaçant dans les mailles primitives des nœuds supplémentaires (au centre des bases, au centre de chacune des faces ou au centre de la maille) on obtient quatorze réseaux cristallins distincts (réseaux de Bravais).

En 1848 Bravais a montré que les sept mailles élémentaires qui définissent les sept systèmes cristallins forment 14 réseaux cristallins existant dans la nature, appelés les réseaux de Bravais.

Tableau I.1. Paramètres cristallographiques des systèmes cristallins primitifs et des réseaux de Bravais.

Système cristallin primitif	Réseaux de Bravais	Longueurs des vecteurs	Angles des vecteurs	Exemples
Triclinique	Simple	$\bar{a} \neq \bar{b} \neq \bar{c}$	$\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq \pi/2$	
Monoclinique	Simple À bases centrées	$\bar{a} \neq \bar{b} \neq \bar{c}$	$\alpha = \beta = \pi/2 \neq \gamma$	
Ortho-rhombique	Simple Centré À bases centrées À faces centrées	$\bar{a} \neq \bar{b} \neq \bar{c}$	$\alpha = \beta = \gamma = \pi/2$	U_{α}, Fe_3C
Quadratique	Simple Centré	$\bar{a} = \bar{b} \neq \bar{c}$	$\alpha = \beta = \gamma = \pi/2$	Martensite
Hexagonal	Simple	$\bar{a} = \bar{b} \neq \bar{c}$	$\alpha = \beta = \pi/2;$ $\gamma = 2\pi/3$	Zn, Mg
Rhombo-édrique	Simple	$\bar{a} = \bar{b} = \bar{c}$	$\alpha = \beta = \gamma \neq \pi/2$	As, Sb, Bi
Cubique	Simple Centré À faces centrées	$\bar{a} = \bar{b} = \bar{c}$	$\alpha = \beta = \gamma = \pi/2$	Fe, Cu, Al

I.6.6. Structures cristallines courantes**1. Cubique simple (CS) :**

La maille : 1 nœud à chaque sommet d'un cube.

Paramètre de la maille : a

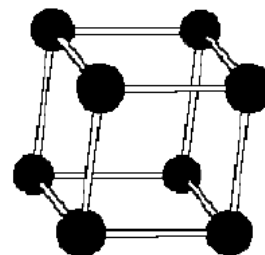
Nombre d'atomes par maille :

$$Z = 8 \times \frac{1}{8} = 1 \text{ atome}$$

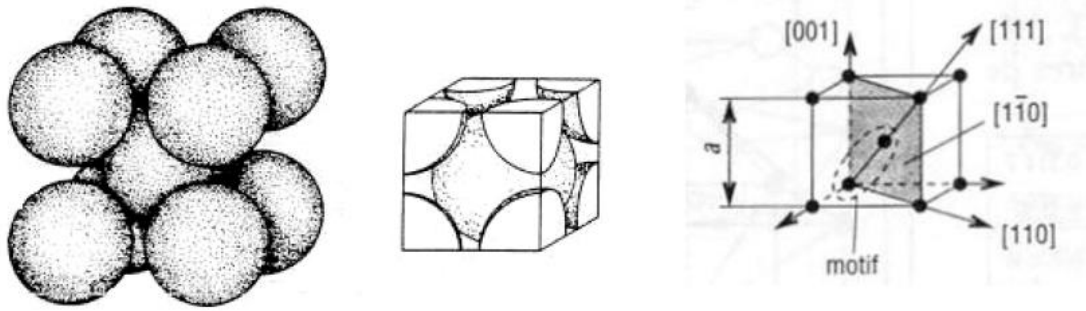
Contact au niveau de l'arrête : $a = 2R$

Compacité :

$$C = \frac{V_{\text{occupé}}}{V_{\text{maille}}} = \frac{\frac{4}{3}\pi R^3}{(2R)^3} = \frac{\pi}{6} \approx 52\%$$

**2. Cubique centré (CC)**

Définie par une maille élémentaire de 2 ions (un au centre et 8 aux sommets du cube mais appartenant chacun à 8 mailles).

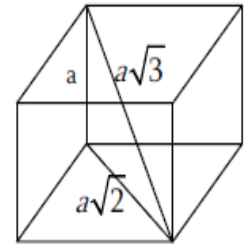


Nombre d'atomes par maille :

$$Z = 8 \times \frac{1}{8} + 1 = 2 \text{ atomes}$$

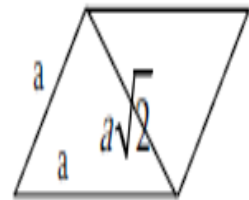
Contact au niveau de la grande diagonale :

$$a\sqrt{3} = 4R \dots \dots \dots a = \frac{4}{\sqrt{3}}R$$



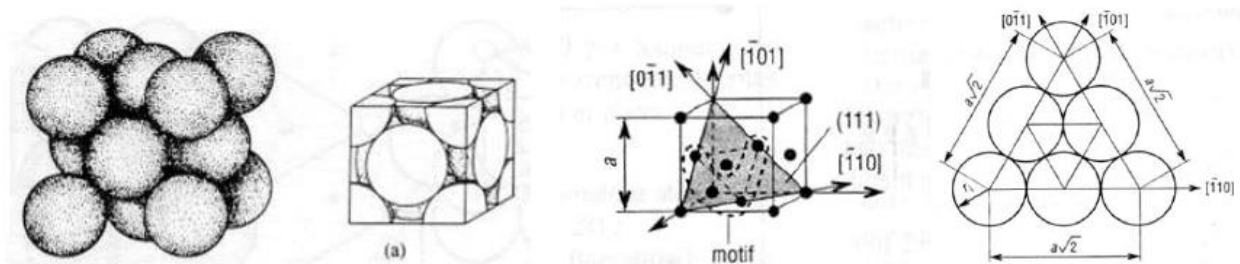
Calcul de la compacité C :

$$C = \frac{2 \times \frac{4}{3} \pi R^3}{\left(\frac{4}{\sqrt{3}}R\right)^3} = \frac{\pi\sqrt{3}}{8} \approx 68 \%$$



3. Cubique à faces centrées (CFC)

Définie par un motif élémentaire de 4 ions (6 sur les faces appartenant chacun à 2 mailles et 8 aux sommets du cube mais appartenant chacun à 8 mailles).



Nombre d'atomes par maille :

$$Z = 8 \times \frac{1}{8} + 6 \times \frac{1}{2} = 4 \text{ atomes}$$

Contact au niveau de la petite diagonale :

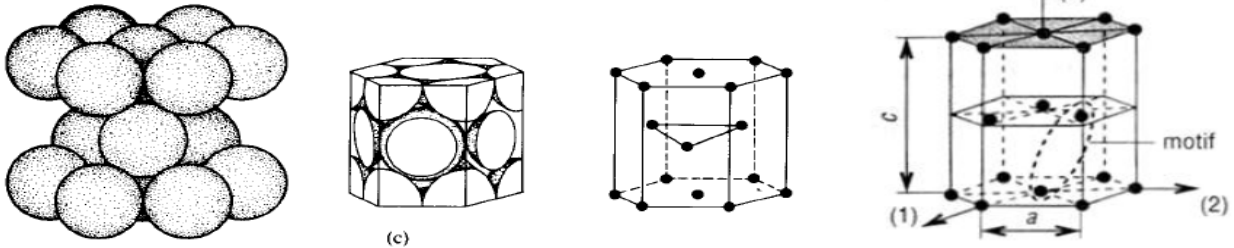
$$a\sqrt{2} = 4R \text{ d'où } a = \frac{4}{\sqrt{2}}R$$

Calcul de la compacité C :

$$C = \frac{4 \times \frac{4}{3} \pi R^3}{\left(\frac{4}{\sqrt{2}} R\right)^3} = \frac{\pi \sqrt{2}}{6} \approx 74 \%$$

4. Hexagonale compacte HC

Définie par un motif élémentaire de 2 ions. La maille représentative contient 6 ions (3 à l'intérieur et 2 sur les bases, communs chacun à 2 mailles, et 12 sur les sommets, communs chacun à 6 mailles).



Nombre d'atomes par mailles :

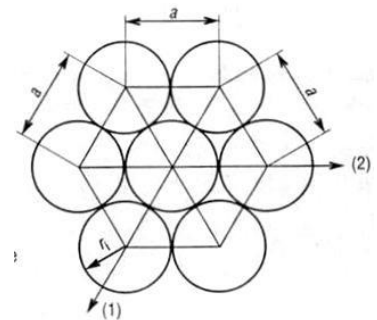
$$Z = 3 + \frac{12}{6} + \frac{2}{2} = 6 \text{ atomes}$$

$$\text{Distance interatomique : } da^2 = \frac{a^2}{3} + \frac{c^2}{4}$$

$$\text{Rayon atomique : } r_a = \frac{a}{2} \dots, \frac{c}{a} = 1.63$$

Calcul de la compacité C :

$$C = \frac{6 \times \frac{4}{3} \pi \cdot (R_a)^3}{3a \frac{a\sqrt{3}}{2} c} \approx 74\%$$



I.7. Les défauts cristallins

Les métaux utilisés dans l'industrie ne sont pas constitués de cristaux parfaits (dans lesquels tous les nœuds seraient bien à leur place), ils ne sont généralement pas purs. Les métaux sont souvent utilisés sous forme d'alliages. La présence de ces impuretés (atomes étrangers) dans les métaux va engendrer la déformation du réseau cristallin du fait qu'ils ont un volume différent par rapport au métal de base. Cette situation va engendrer des « erreurs » dans les empilements qui peuvent être décrits comme des défauts ponctuels, linéaires et plans.

Les cristaux réels comportent différents types de défauts qui représentent tous un surcroît d'énergie interne du cristal par rapport à un cristal parfait, et par conséquent un écart par rapport à la stabilité maximale.

I.7.1. Défauts ponctuels

Ce sont des défauts sans dimension qui ont une taille de l'ordre de la distance interatomique. Il existe trois types de défauts ponctuels : les **lacunes**, les **interstitiels** et les **atomes en substitution**, comme cela est décrit sur la figure I.8.

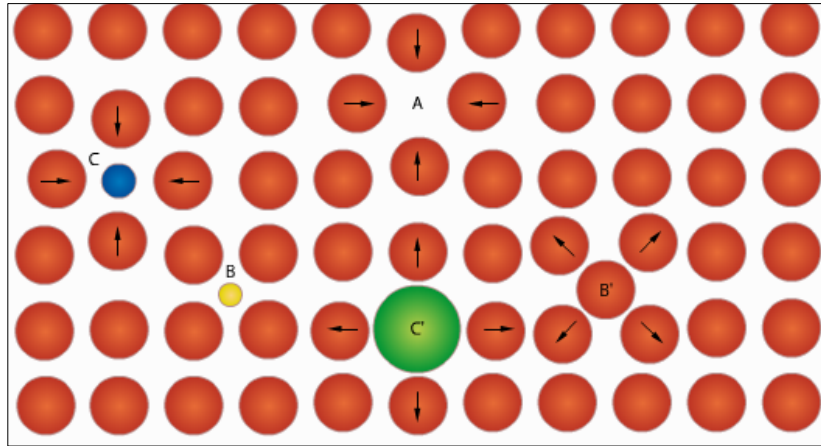
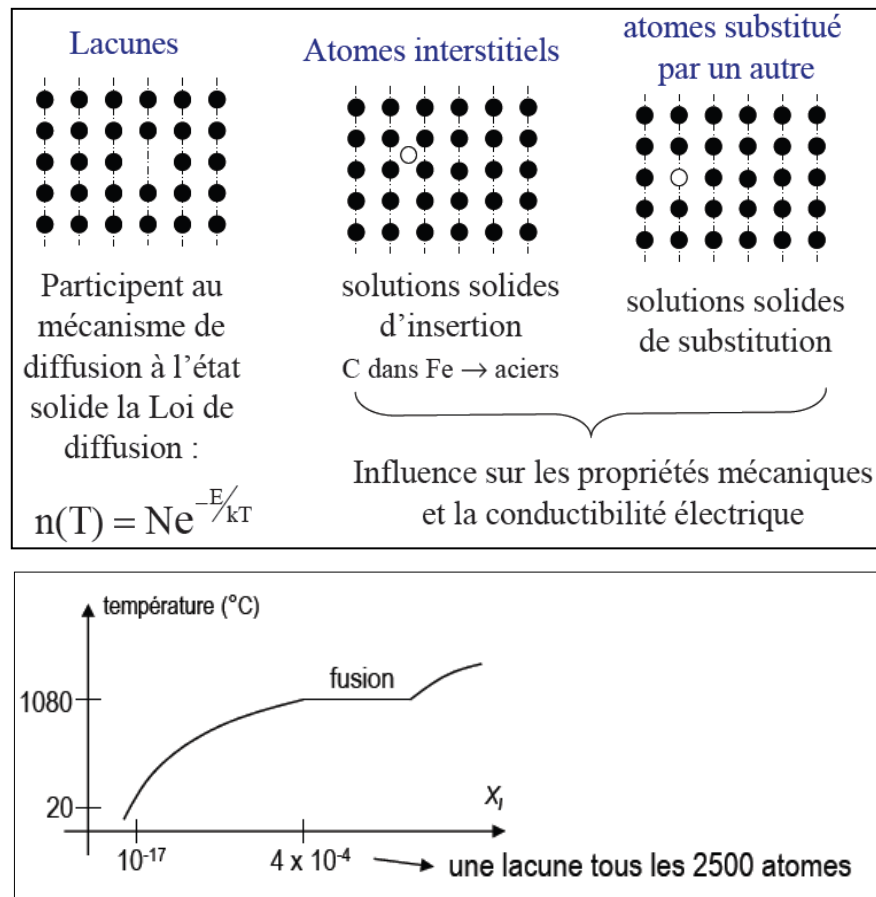


Figure I.8. Types de défauts ponctuels dans les cristaux : A- Lacune, B- Atome étranger interstitiel, B'-Auto-interstitiel, C et C'- Atomes étrangers en substitution

- **Lacunes** : Les lacunes sont des vides qui existent quand l'emplacement normal d'un atome (ou de plusieurs contigus) n'est pas occupé. La présence d'une lacune dans le réseau provoque la distorsion de celui-ci ; les atomes proches se déplacent vers le vide ainsi créé pour rétablir un équilibre des forces de liaison. Les lacunes sont en perpétuel mouvement à l'intérieur du cristal du à l'agitation thermique. Ce mouvement se fait grâce à des permutations entre la lacune et les atomes voisins. Les lacunes jouent un rôle fondamental dans la diffusion à l'état solide qui engendre des déplacements d'atomes sur de longues distances et est à la base des traitements thermiques.
- **L'interstitiel** : Apparaît lorsqu'un atome étranger de petite taille (B) s'insère dans les espaces vides du réseau cristallin. Lorsqu'un atome constitutif du cristal est placé en insertion, nous avons un atome auto-interstitiel (B').
- **L'atome en substitution** : Lorsqu'un atome du réseau du métal de base est remplacé par un atome étranger (C, C').



Le nombre N_f de défauts ponctuels est fonction de la température, il est donné par une relation (I.4) de type Arrhenius :

$$N_f = N \cdot \exp\left(-\frac{Q_f}{kT}\right) \dots\dots\dots (I.4)$$

Où : N est le nombre de nœuds du réseau, Q_f est l'énergie de formation d'un défaut (de l'ordre de **1eV** pour défaut lacunaire et **7eV** pour un interstitiel). Le paramètre k est la constante de Boltzmann ($k = 1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K).

I.7.2. Défauts linéaires ou dislocations

Ils constituent des sortes de « plis » des plans atomiques dans le cristal, dont l'amplitude, égale à un nombre entier de distances interatomiques, permet de retrouver le cristal parfait à longue distance. On les appelle **dislocations**.

Ils représentent des perturbations importantes du réseau cristallin. Ils sont à l'origine de tous les processus liés à la déformation plastique. On distingue deux types de dislocations : dislocation coin et dislocation vis.

- **Dislocation coin** : Défaut centré autour d'une ligne le long de laquelle se termine un 1/2 plan atomique supplémentaire à l'intérieur du cristal (Voir Figure I.9).

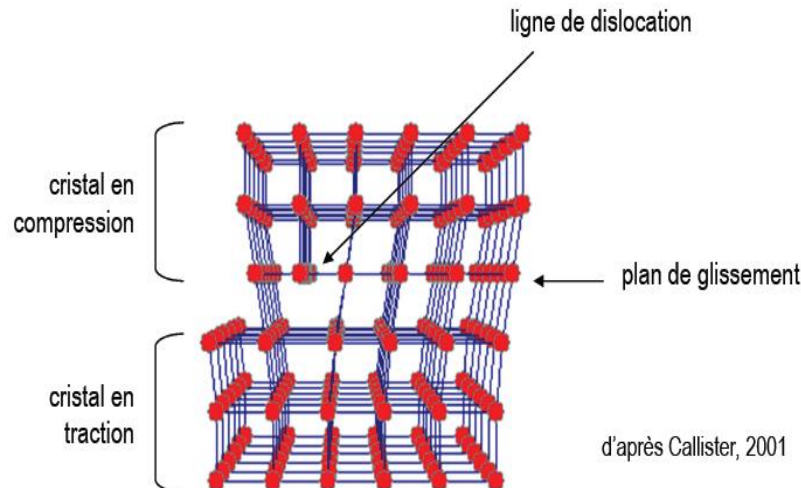


Figure I.9. Une dislocation coin du point de vue des milieux continus (c'est-à-dire en faisant abstraction des atomes)

- **Dislocation vis :**

La dislocation vis est représentée schématiquement par la figure I.10 ; elle résulte d'un cisaillement de deux portions d'un cristal l'une par rapport à l'autre, effectué le long d'un plan cristallographique. Elle est ainsi appelée parce qu'elle transforme les plans atomiques en une surface hélicoïdale, comme la gorge d'une vis. Comme la dislocation coin, elle crée une déformation plastique en se déplaçant. Ses propriétés sont celles d'une dislocation coin. Toute dislocation d'un cristal est vis, coin ou mixte.

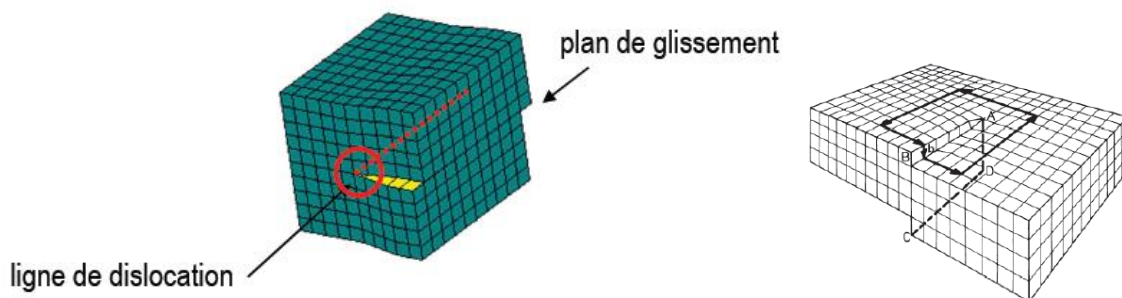


Figure I.10. Représentation schématique d'une dislocation vis

La **dislocation vis** est le résultat d'un cisaillement du réseau parallèlement à la ligne de dislocation.

I.7.3. Défauts surfaciques

Sauf élaboration particulière, la quasi-totalité des solides cristallins est constituée d'un agglomérat de cristaux, ou **grains** accolés avec des orientations différentes (Figure I.11). La taille des grains varie de quelques microns à quelques millimètres suivant les conditions d'élaboration. Si ces cristaux sont de nature identique, leur surface d'accrolement est appelée **joint de grains**. Si les cristaux sont de nature différente, leur surface d'accrolement est appelée **joint de phases**.

1) Les joints de grains

Ce sont les zones de grand désordre (ayant une épaisseur de l'ordre de quelques distances interatomiques) séparant les cristaux dans un même solide polycristallin (Figure suivante)

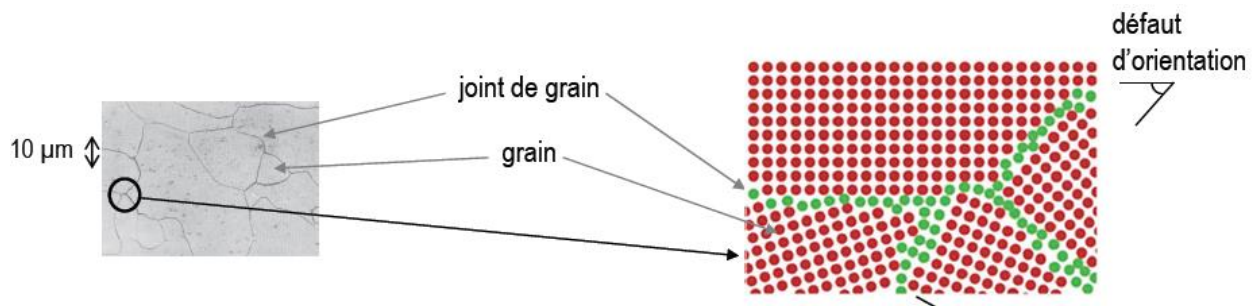


Figure I.11. Polycrystal, et schématisation à deux dimensions d'un joint de grains.

Les matériaux cristallins utilisés couramment, sont généralement polycristallins. Ils ne sont pas formés d'un seul grain (monocristal) mais d'un ensemble de grains de taille plus ou moins grande (de 1 μm à plusieurs centimètres selon le mode d'élaboration et les traitements subis par le matériau). Ces grains sont juxtaposés et les régions où les différents grains sont en contact sont appelés les joints de grains. Ces régions sont des zones de transition caractérisées par des structures plus ou moins perturbées qui permettent l'accommodation géométrique et cristallographique des grains constitutifs du polycrystal. De manière générale, les joints de grains sont à la fois des sources et des pièges pour les défauts ponctuels et les dislocations.

2) Les joints de macles

Un joint de macle est un plan (dans lequel les nœuds restent correctement ordonnés selon le système cristallin du métal) de part et d'autre duquel les réseaux des deux cristaux sont symétriques (et non plus alignés comme ce serait le cas dans un cristal unique). Les macles apparaissent fréquemment au cours de la déformation plastique des métaux CFC. Le maclage se rencontre souvent dans les cristaux hexagonaux, car ceux-ci possèdent moins de possibilités de glissement que les cristaux cubiques.

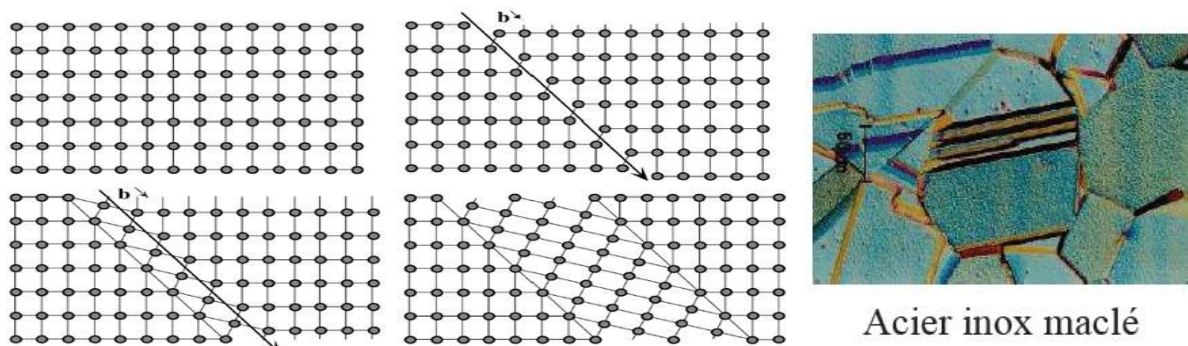


Figure I.12. Maclage

I.7.4. Défauts volumiques

Ce sont les fissures, les pores, les inclusions et les précipités. Sont introduits dans les matériaux au cours des différentes étapes de traitement et de fabrication. Précipités introduits volontairement : durcissement structural

Pore. Cavité fermée à l'intérieur d'un cristal ou d'un polycristal.

Inclusion. Particule d'un solide de nature différente enrobée dans le solide principal ou **matrice**.

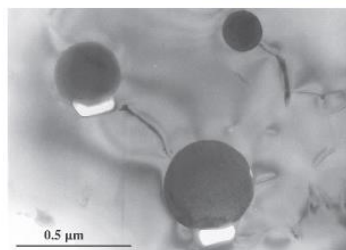
Précipité. Particule solide de petite taille entièrement enrobée à l'intérieur d'un grain qui constitue sa matrice. En général les précipités apparaissent dans un cristal à l'issue de réactions à l'état solide. Selon les caractéristiques des deux réseaux cristallins, les joints de phases entre précipité et matrice peuvent avoir différentes structures : interface cohérente, semi-cohérente, incohérente (Figure I.13).



alliage
d'aluminium



sable dans de la roche



précipités de Fe dans
de l'olivine $(\text{Fe, Mg})_2\text{SiO}_4$
d'après Leroux, LSPEs, Université de Lille

Figure I.13. Exemples de défaut tridimensionnels

CHAPITRE II

PROPRIETES MECANIQUES

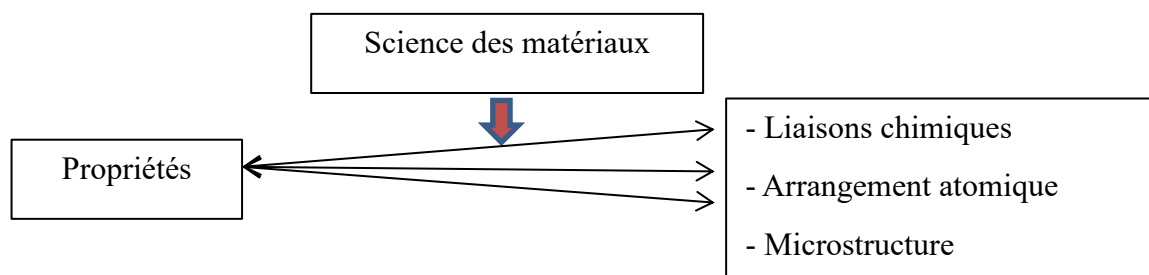
II. PROPRIETES MECANQUES

II.1. Généralités

Une propriété mécanique est une propriété caractéristique d'un matériau qui décrit son comportement lorsqu'il est soumis à une ou plusieurs contraintes mécaniques. Les propriétés mécaniques des matériaux sont d'un grand intérêt puisqu'elles conditionnent, non seulement les problèmes de mise en forme des matériaux, mais également leur comportement en service dans des applications industrielles extrêmement diversifiées.

Le choix des matériaux pour une application industrielle donnée exige une connaissance et une maîtrise de ses caractéristiques mécaniques. A ce stade, la caractérisation mécanique des matériaux repose sur l'étude de son comportement vis-à-vis des sollicitations extérieures qui engendrent des contraintes et des déformations. Pour cela, on recourt à un certain nombre d'essais normalisés. Ces derniers, permettent de déterminer les grandeurs physiques caractérisant le comportement mécanique des matériaux testés.

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



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

Tous les matériaux interagissent avec des agents extérieurs lorsqu'ils sont en service (utilisés). A titre d'exemples : Un matériau sur lequel s'exerce une force subit une déformation ou bien une surface métallique polie réfléchit la lumière...etc

Les propriétés des matériaux sont divisées en trois (3) grandes catégories :

- *Propriétés Mécaniques* : qui reflètent le comportement des matériaux lorsqu'ils sont sollicités par des efforts extérieurs.
- *Propriétés physiques* : concernent le comportement des matériaux soumis à l'action de la température, des champs électriques ou magnétiques ou de la lumière :
 - ✓ Electriques ;
 - ✓ Thermiques ;
 - ✓ Magnétiques ;
 - ✓ Optiques.
- *Propriétés Chimiques* : caractérisent le comportement des matériaux dans un environnement réactif.

II.2. Comportement mécanique des matériaux

Les propriétés mécaniques concernent la déformation d'un matériau soumis à une force externe. Les essais mécaniques permettent de déterminer le comportement mécanique des matériaux pour tout type d'effort / nature de contrainte. La résistance, la dureté, la ductilité, la rigidité et la ténacité représentent les principales propriétés mécaniques des matériaux.

II.2.1. Notions de contraintes et déformations

Quand un corps ou un matériau est soumis à l'action de forces extérieures, des contraintes internes s'établissent. A ces contraintes, sont associées des déformations. La figure II.1 illustre les modes de sollicitations mécaniques :

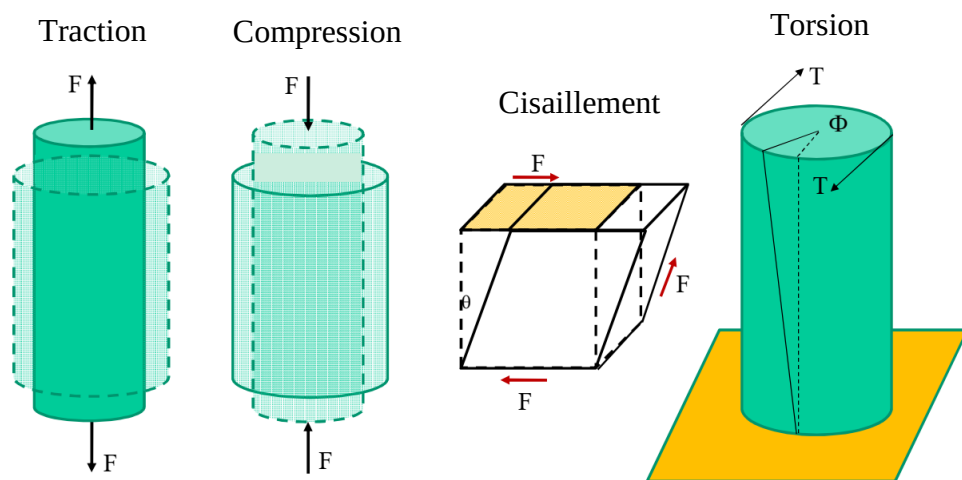


Figure II.1. Modes de sollicitations mécaniques

A/ Contraintes normales : Traction simple

Soit un corps cylindrique soumis à deux forces opposées F_1 et F_2 comme illustré ci-dessous (schéma 1). Les deux forces appliquées sont :

- Colinéaires ;
- Normales à la section ;
- De même valeur $F_1 = F_2 = F$

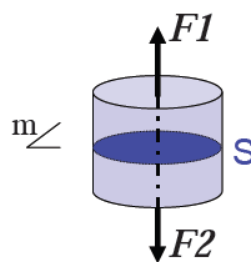


Schéma 1

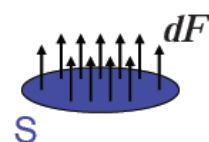


Schéma 2

Selon le plan (m) perpendiculaire à l'axe de traction (Voir schéma 2), la surface S est soumise à une série de forces dF de sorte que $\sum dF = F$

La surface S est soumise à une contrainte normale de traction :

$$\sigma = \frac{dF}{dS} \dots\dots\dots (II.1)$$

$$F = \iint_S \sigma dS \dots\dots\dots (II.2)$$

Pour une traction simple, σ est la même sur toute la surface S, l'équation (II.1) devient :

$$\sigma = \frac{F}{S} \dots\dots\dots (II.3)$$

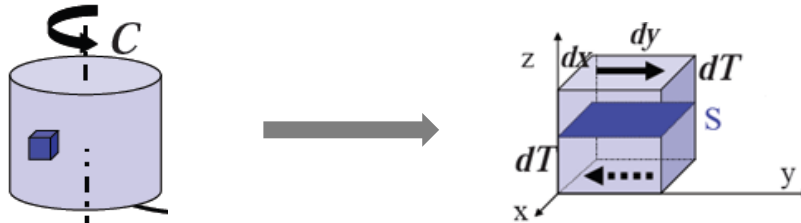
Contrainte normale de traction



contrainte perpendiculaire à la surface S

B/ Contraintes tangentielles : Torsion simple

Soit la force de torsion C qui s'exerce sur le cylindre ci-dessous :



Force élémentaire dT sur le volume $dx dy dz$

Contrainte élémentaire τ constante sur S.

$$\tau = \frac{dT}{dx dy} \dots\dots\dots (II.4)$$

Contrainte élémentaire τ constante sur S d'où : $\tau = \frac{T}{S} \dots\dots\dots (II.5)$

contrainte tangentielle de cisaillement ou cission



contrainte parallèle à la surface S

C/ Déformation de traction

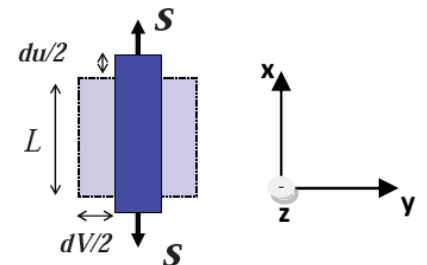
Considérons un élément de matière cubique ci-contre de côté L,
Après application de la contrainte σ , le cube est déformé selon les 3 directions :

a) Allongement du parallèle // traction ;

$$\varepsilon_{//} = du / L \quad \text{Déformation longitudinale}$$

b) Accourcissement dv perpendiculaire ($\perp$) à la traction

$$\varepsilon_{\perp} = dv / L \quad \text{Déformation latérale}$$



Le rapport des deux déformations est exprimé par la relation :

$$\nu = - \frac{\text{Déformation latérale}}{\text{Déformation longitudinale}} \quad \nu = - \frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel}}$$

ν : coefficient de poisson

D/ Déformation de cisaillement

Après application de la contrainte τ (Figure 6), le cube est déformé en cisaillement γ qui s'écrit :

$$\gamma = \frac{dw}{L} = \tan \theta \dots\dots\dots (\text{II.6})$$

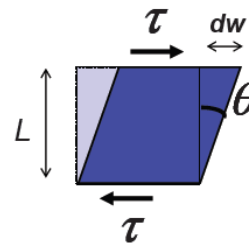


Fig. 6. Déformation de cisaillement

Si les déformations sont faibles



$\gamma = \theta$ angle de cisaillement

Par ailleurs, une compression hydrostatique sous une pression p permet de définir le **module de compressibilité** K (ou χ) du matériau, en MPa, à partir de la variation relative de volume :

$$\frac{\Delta V}{V_0} = - \frac{P}{K} \dots\dots\dots (\text{II.7})$$

II.2.2. Déformation élastique des matériaux

Dans un solide, la distance moyenne d entre deux atomes s'établit à une valeur d_0 fonction de la nature des liaisons (Figure II.2). Si on impose aux atomes un déplacement au voisinage de leur position d'équilibre, la force d'interaction les rappelle à la distance d_0 (sauf dans le cas d'un écartement au-delà de d_d , distance de dissociation des atomes). De telles déformations élastiques nécessitent donc l'application d'une force extérieure pour vaincre la force de rappel et sont réversibles lorsque cette force extérieure est supprimée.

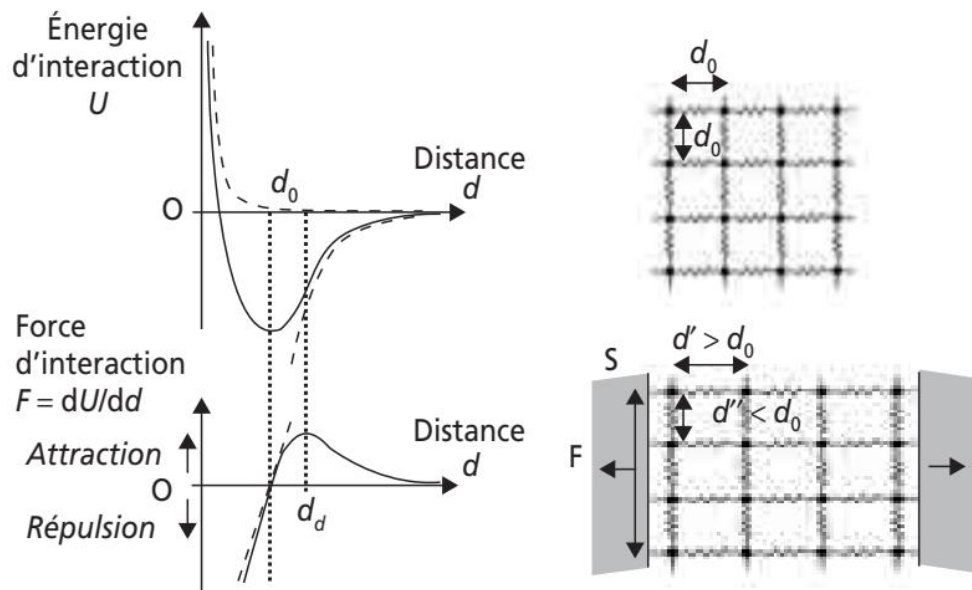


Figure II.2. Variations de l'énergie d'interaction et de la force d'interaction entre deux atomes en fonction de leur distance d . De part et d'autre de la distance d_0 d'équilibre, la force de rappel est approximativement proportionnelle à l'écart $d - d_0$.

Pour de faibles déplacements, la force de rappel peut être considérée comme proportionnelle au déplacement $d - d_0$. Les allongements (ou raccourcissements) relatifs ou **déformations** ε du solide (sans dimension), sont alors proportionnels à la densité surfacique de force, ou **contrainte** σ (figure II.2), ce que traduit la **loi de Hooke** (II.8) :

$$\sigma = \frac{F}{S} = E \cdot \frac{d - d_0}{d_0} = E \cdot \varepsilon \dots\dots\dots (II.8)$$

Les contraintes s'expriment en MPa (ou N/mm²) et les déformations étant sans dimensions, le coefficient E , appelé **module d'élasticité à la traction** ou **module de Young** du matériau, s'exprime en GPa. Simultanément à la déformation dans la direction d'application de la force, des déformations de signe opposé se produisent dans les directions orthogonales (Figure II.2).

En effet, la déformation élastique correspond à de petits déplacements réversibles des atomes autour de leur position d'équilibre dans le réseau cristallin. Sous l'action d'une force, les atomes s'écartent. Une réaction due aux forces de liaison tendant à les rapprocher provoque la réaction.

Pour les matériaux métalliques et les polymères non étirés et non renforcés, les caractéristiques d'élasticité sont indépendantes de la direction et le comportement élastique est linéaire.

Ce n'est pas le cas pour les composites ou certains polymères pour lesquels le module de Young varie avec l'amplitude de la déformation du fait de l'orientation des chaînes macromoléculaires : ce comportement correspond à des lois d'élasticité non linéaire.

II.2.3. Déformation plastique

Le comportement élastique, caractérisé par la réversibilité des déformations lors de la suppression des contraintes, ne se manifeste seul que pour des contraintes inférieures à une valeur limite, appelée limite d'élasticité.

Lorsque la limite d'élasticité est dépassée, les atomes du réseau cristallin changent de place sous l'action d'un effort mécanique.

La prise en compte des défauts du cristal, notamment les dislocations, est indispensable pour comprendre le comportement plastique. Lorsqu'une déformation plastique est provoquée, on constate que la résistance à la déformation augmente car :

- les dislocations interagissent entre elles ;
- de nouvelles dislocations prennent naissance, venant augmenter les interactions.

Cette augmentation de la résistance à la déformation plastique est appelée *l'écrouissage*.

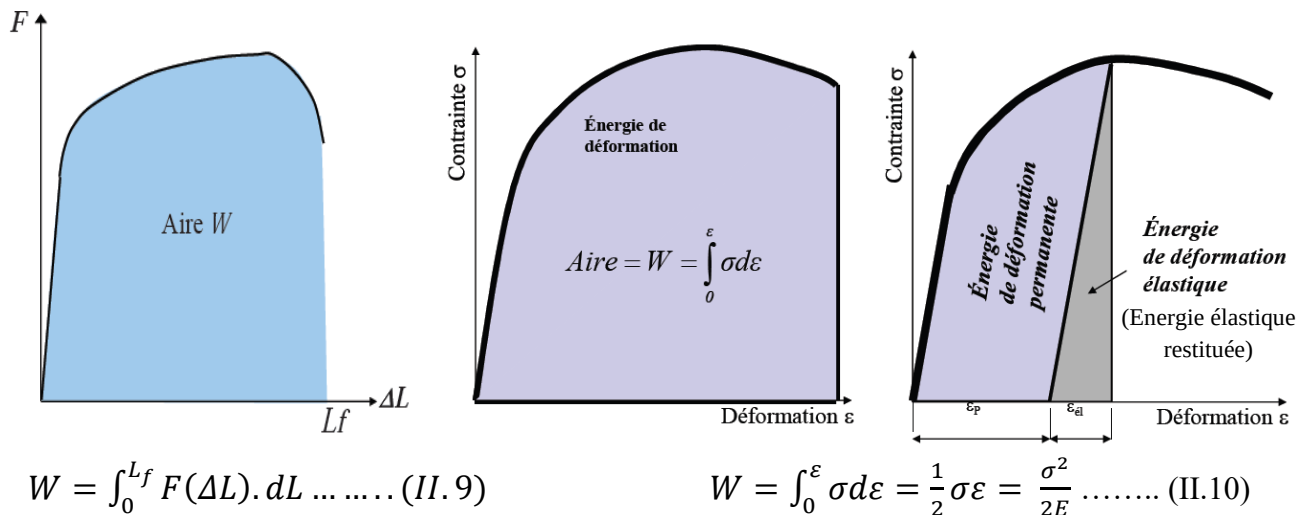
Si on relâche l'effort qui a provoqué la plasticité, on constate un retour élastique : le domaine élastique s'étend jusqu'à la contrainte qui était appliquée précédemment, ce qui se traduit par une augmentation de la limite élastique.

Ce phénomène est limité par l'apparition de microcavités qui provoquent une diminution de la section résistante et conduisent à la rupture ductile.

II.2.4. Energie de déformation : Ténacité

Il s'agit de la capacité d'un matériau à emmagasiner de l'énergie avant sa rupture. Elle caractérise la résistance du matériau à la propagation brutale de fissures.

L'aire sous la courbe de traction $F(\Delta L)$ représente l'énergie nécessaire pour rompre l'éprouvette.



II.3. Essais mécaniques et propriétés des matériaux

II.3.1. Essai de traction uni-axiale

L'essai de traction est le moyen le plus couramment employé pour caractériser le comportement mécanique d'un matériau sous une sollicitation progressive à vitesse de chargement faible ou modérée. Des éprouvettes du matériau concerné, en forme de barreau cylindrique ou prismatique comportant une partie centrale calibrée à section constante S_0 et longueur L_c raccordée à chaque extrémité à deux têtes de section plus importante, sont fixées dans une machine de traction. La machine impose un allongement croissant à l'éprouvette, et enregistre simultanément l'effort appliqué F et l'allongement $\Delta L = L - L_i$. Selon l'équipement utilisé, L_i est soit la longueur totale initiale L_c , soit une longueur initiale de référence L_0 entre deux repères tracés sur l'éprouvette (figure II.3). L'essai est généralement poursuivi jusqu'à rupture, après quoi on mesure un **allongement ultime rémanent** ΔL_u .

Ce type d'essai est normalisé par des normes (règlementations) :

- ✓ Géométrie des éprouvettes ;
- ✓ Machine d'essai et leur étalonnage ;
- ✓ Techniques expérimentales mises en œuvre ;
- Le dépouillement des résultats et leur présentation.

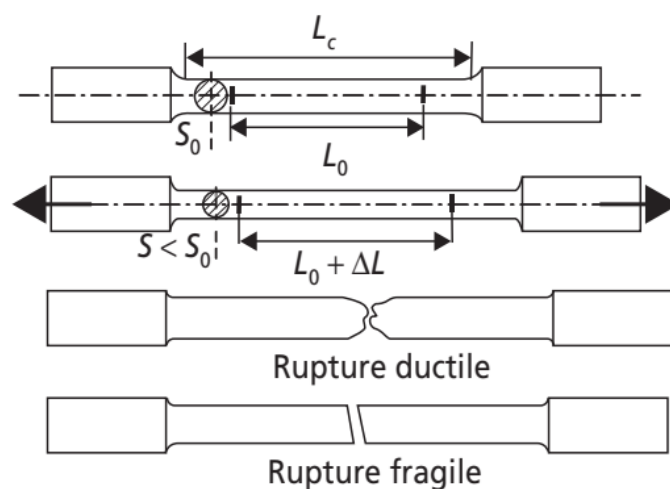


Figure II.3. Schéma d'une éprouvette de traction cylindrique et de son évolution en cours d'essai.

II.3.1.1. Courbe de traction conventionnelle

C'est la courbe obtenue à partir de l'enregistrement $F \times \Delta L$ effectué en cours d'essai en rapportant la force à la section initiale pour raisonner en termes de contrainte $R = F/S_0$, et en rapportant l'allongement à la longueur initiale pour raisonner en termes d'allongement relatif $\varepsilon = \Delta L/L_i$. On

obtient ainsi une courbe intrinsèque au matériau, indépendante des dimensions de l'éprouvette utilisée (figure II.4.a).

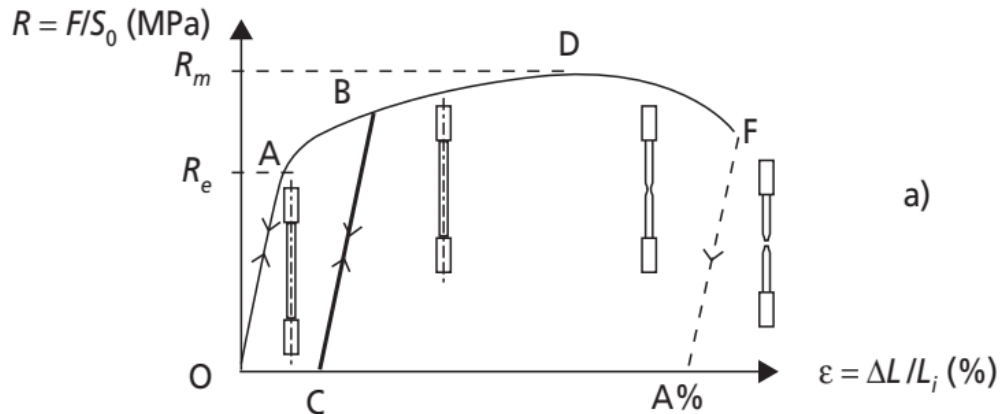


Figure. II.4a. Courbe conventionnelle typique de traction

Où :

OA : allongement élastique linéaire, réversible.

Au-delà de A : déformation plastique permanente + déformation élastique.

La suppression de la force appliquée (BC) laisse apparaître un allongement plastique rémanent (OC). Une remise en charge conduit à une nouvelle limite d'élasticité (CB).

Re : Limite apparente d'élasticité (MPa).

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \dots\dots\dots (\text{II.11})$$

Rp0,2 : limite conventionnelle d'élasticité à 0,2% de déformation plastique ; sa détermination nécessite souvent l'usage d'un extensomètre.

AD : allongement élastique + allongement plastique réparti.

Rm : Résistance à la traction (MPa).

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \dots\dots\dots (\text{II.12})$$

DF : apparition et progression d'une **striction Z** (réduction de section localisée) dans les matériaux ductiles.

F : Point de rupture de l'éprouvette.

Z% : Coefficient de striction, avec S_u ; section à la rupture.

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} 100\% \dots\dots\dots (\text{II.13})$$

A% = $\Delta L_u / L_i$: allongement pour cent après rupture (%).

E : module de Young (GPa) ;

En pratique, seule l'utilisation d'un dispositif extenso-métrique très précis permet d'exploiter la pente de la montée élastique pour la mesure de E.

$$E = \frac{R_e}{\varepsilon_e} \dots\dots\dots (\text{II.14})$$

II.3.1.2. Courbe de traction rationnelle

C'est la courbe obtenue en rapportant la force à la section minimale instantanée S , pour raisonner en termes de contrainte vraie $\sigma = F/S$, et en rapportant l'allongement à la longueur instantanée pour raisonner en termes de déformation rationnelle $\varepsilon = \delta L/L$. La courbe ainsi obtenue est croissante, même pendant la striction (Figure II.4.b).

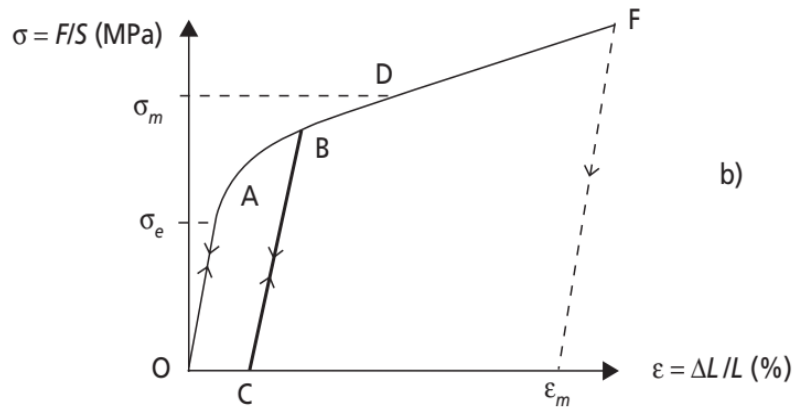


Fig. II.4b. Courbe rationnelle typique de traction

Le volume de l'éprouvette restant constant et la déformation étant uniformément répartie de O à D, on a :

$$\sigma = F \cdot \frac{(1+e)}{S_0} = R(1+e) \quad \text{et} \quad \varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln(1+e) \dots\dots\dots (\text{II.15})$$

Où :

$e = \Delta L/L_i$ allongement relatif ;

De D à F, pendant la striction, des corrections plus complexes sont nécessaires pour calculer σ et ε dans la zone de déformation localisée.

II.3.2. Essais de dureté

La dureté d'un matériau caractérise sa résistance à la pénétration : un pénétrateur de géométrie connue est appliqué sur la surface du matériau à tester avec une force connue pendant un temps donné. Plus l'empreinte laissée est petite, plus le matériau est dur. Bien que la dureté ne soit pas une propriété simple à définir, les essais de dureté sont très utilisés en raison de leur simplicité et de leur caractère peu destructif. Leur résultat donne un aperçu synthétique des propriétés mécaniques du matériau testé.

II.3.2.1. Essai Brinell

Le pénétrateur est une bille en acier trempé (dureté HBS) ou en carbure de tungstène (dureté HBW) de diamètre D (mm). L'empreinte est une calotte sphérique de diamètre moyen d (en mm, moyenne de deux diamètres orthogonaux mesurés à l'aide d'un appareil optique approprié). La charge d'essai F (N) est choisie dans une gamme normalisée adaptée à D et au matériau testé. La dureté est donnée par le rapport de F (en kg force à l'origine) à la surface de l'empreinte, exprimée sans dimension :

$$\text{HBS ou HBW} = \frac{0.102 \cdot 2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \dots\dots\dots (\text{II.16})$$

Pour éviter la déformation et la détérioration de la bille, l'usage de l'essai Brinell est limité aux matériaux tels que $\text{HBS} < 350$ ou $\text{HBW} < 650$.

II.3.2.2. Essai Vickers

Le pénétrateur est une pyramide en diamant, à base carrée et d'angle au sommet entre faces opposées égal à 136° . L'empreinte est une pyramide en creux de diagonale moyenne d (en mm, moyenne des deux diagonales du carré de base, mesurées à l'aide d'un appareil optique approprié). La charge d'essai F (N) est choisie dans une gamme normalisée. La dureté est donnée par le rapport de F (en kg-force à l'origine) à la surface latérale de l'empreinte pyramidale, exprimée sans dimension :

$$\text{HV} = 0.102 \frac{2F \cdot \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} = 0.189 \frac{F}{d^2} \dots\dots\dots (\text{II.17})$$

Les duretés Brinell et Vickers donnent des résultats du même ordre, variant de quelques unités pour des matériaux très mous (plomb, matières plastiques...) jusqu'à quelques milliers pour les matériaux très durs (céramiques, carbures métalliques...etc).

II.3.2.3. Essai Rockwell

Le pénétrateur est soit une bille en acier trempé, soit un cône en diamant, et la charge d'essai peut prendre plusieurs valeurs (Tableau II.1). La dureté est définie à partir de la différence de profondeur de pénétration après application de la charge (Tableau II.2) :

- Le pénétrateur est appliqué sur la surface de la pièce avec une précharge F_0 . Il descend alors à un niveau qui sert d'origine aux mesures de profondeur ultérieures.
- Une surcharge F_1 est appliquée, pour atteindre la valeur de la charge totale d'essai F ; le pénétrateur descend.
- La surcharge est retirée, entraînant une légère remontée du pénétrateur en raison de la disparition d'une partie élastique de la déformation.
- On mesure alors à l'aide d'un comparateur l'accroissement h de la profondeur de pénétration, entre le début et la fin de l'essai sous précharge F_0 .

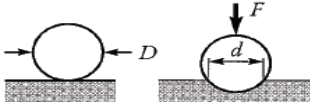
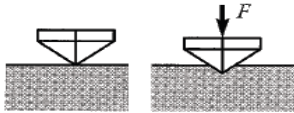
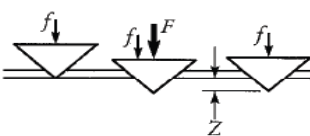
La dureté Rockwell, notée HRC, est un nombre sans dimension compris entre 0 et 100 (ou 130), défini comme le complément de h à une profondeur de référence de 0,2 mm (respectivement 0,26 mm) partagée en cent (resp. 130) graduations identiques.

Tableau II.1. Caractéristiques de l'essai Rockwell

Echelle	Indenteur	Charge (kg)	Symbole	Matériaux
A	Cône en diamant	60	HRA	Carbures, matériaux très durs
B	Bille d'acier 1/16	100	HRB	Bronze et Alu, aciers doux
C	Cône en diamant	150	HRC	Aciers à haute résistance
D	Cône en diamant	100	HRD	Aciers à haute résistance
E	Bille d'acier 1/8	100	HRE	Matériaux mous
F	Bille d'acier 1/16	60	HRF	Alliages de cuivre revenu, tôle de métal, Al
G	Bille d'acier 1/16	150	HRG	Cupro-nickel, Alliages de Cu-Ni-Zn

Le tableau II.2 ci-dessous résume les caractéristiques des différents essais de dureté.

Tableau II.2 : Caractéristiques des principales mesures de la dureté

Méthode d'essai	Géométrie du pénétrateur	Charge F	Principe de l'essai	Paramètre mesuré	Dureté
Brinell	Bille d'acier dur ou de carbure (10 mm de diam.)	500 ou 3000 kgf		Diamètre de l'empreinte (d)	$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$
Vickers	Pyramide de diamant à base carrée; angle entre les faces opposées: 136°	5 à 100 kgf (microdureté: 5 à 1000 gf)		Diagonale de l'empreinte (d)	$HV = \frac{1,854 F}{d^2}$
Rockwell C	Cône de diamant d'angle au sommet de 120°	Précharge f de 10 kgf; $F = 150$ kgf		Profondeur de l'empreinte (Z)	$HRC = f(Z)$
Rockwell B	Bille d'acier dur (1,59 mm de diam.)	Précharge f de 10 kgf; $F = 100$ kgf	Même principe que Rockwell C	Profondeur de l'empreinte (Z)	$HRB = f(Z)$

La relation entre les échelles de dureté Brinell, Rockwell C et Rockwell B et la résistance à la traction des aciers au carbone et des aciers faiblement alliés est donnée dans la Figure II.5 :

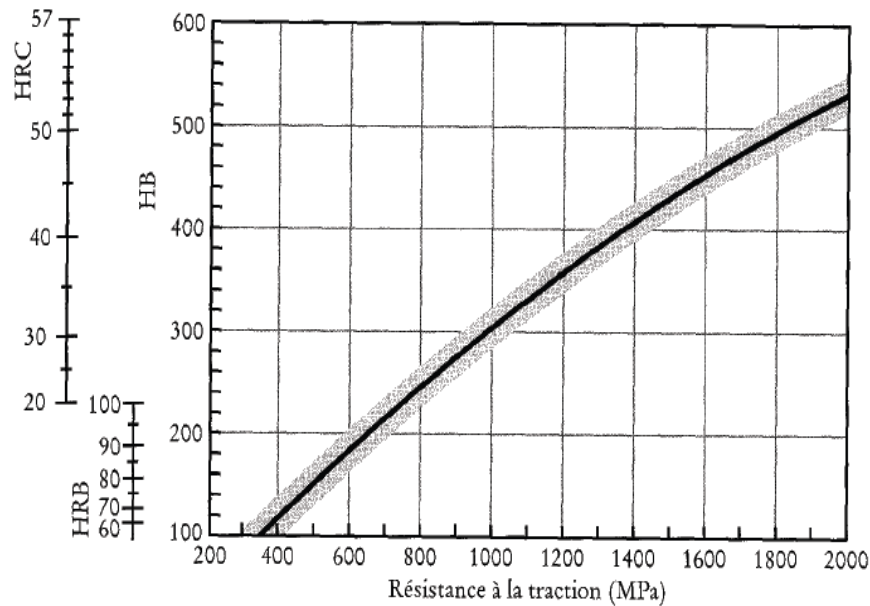


Figure II.5. Corrélation entre les duretés et la résistance à la traction des aciers :
 $R_m \text{ (MPa)} \approx 3.5 \text{ HB}$

II.3.2.4. Autres essais de dureté

Il existe encore d'autres essais pour mesurer la dureté des matériaux, on peut citer entre autres : Essai Shore, Echelle de Mohs, Essai de rebondissement, les micro duretés et nano indentation.

II.3.3. Autres essais mécaniques

II.3.3.1. Essai de compression

Une éprouvette cylindrique ou prismatique est comprimée entre deux plateaux rigides dont le déplacement est imposé (Figure II.6). La courbe « force $\times$ déplacement » enregistrée permet de déterminer le module de Young E , la limite d'élasticité R_e , la contrainte de rupture pour les matériaux fragiles, mais non pour les matériaux ductiles en raison de l'absence de striction. Les éprouvettes utilisées ont couramment un élancement compris entre deux et quatre pour éviter d'une part un état de contraintes trop inhomogène près des faces d'appui, d'autre part un risque de flambement.

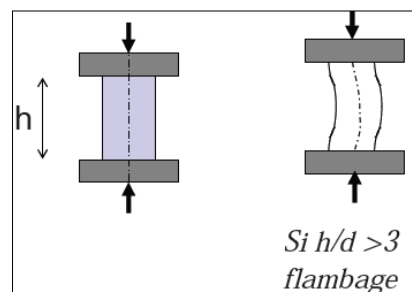


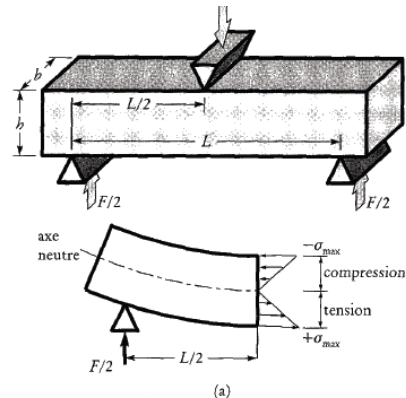
Figure II.6. Principe de l'essai de compression

II.3.3.2. Essai de flexion

Une éprouvette plate (plaque ou tôle) est sollicitée en flexion 3-points ou 4-points entre les appuis d'une machine imposant le déplacement (Figure II.7). La courbe « force × flèche » enregistrée permet de déduire E et R_e si les proportions de l'éprouvette permettent d'utiliser les formules de la théorie des poutres (approximativement : plus courte distance entre appuis $\geq 5 \times$ largeur $\geq 5 \times$ épaisseur).

Les essais de compression et flexion sont utilisés pour les matériaux durs et fragiles, pour lesquels la réalisation d'éprouvettes et d'essais de traction est difficile.

$$\sigma_{max} = \pm \frac{3}{2} \left(\frac{F.L}{bh^2} \right) \dots\dots\dots (II.18)$$



$$\sigma_{max} = \pm \frac{3}{2} \left(\frac{F(L-l)}{bh^2} \right) \dots\dots\dots (II.19)$$

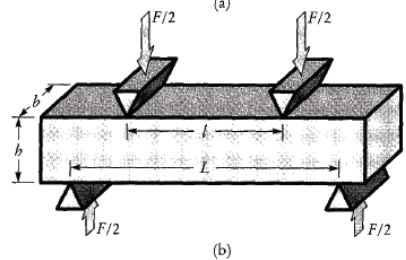


Figure II.7. Principe de l'essai de flexion : (a) 3-points et (b) 4-points

II.4. Classification des matériaux selon le comportement mécanique

Comme illustré sur la figure II.8, les matériaux peuvent être classifiés, selon leur comportement mécanique, en matériaux fragiles, ductile et autres.

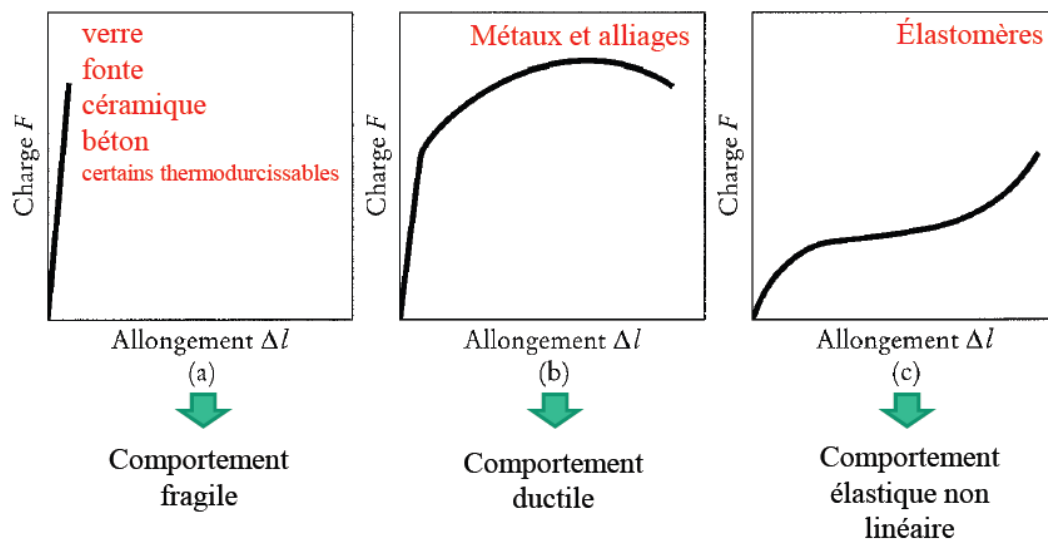


Figure II.8. Classification des matériaux selon leur comportement mécanique

Le Tableau II.6 montre quelques valeurs indicatives des caractéristiques mécaniques de quelques matériaux.

Tableau II.5. Propriétés et caractéristiques mécaniques de quelques métaux et alliages

Métal / alliage	Limite conventionnelle d'élasticité $R_{e0.2}$ (MPa)	Resistance à la traction R_m (MPa)	Allongement à la rupture A (%)
Acier	180	380	25
Aluminium	35	90	40
Cuivre	69	200	45
Fer	130	262	45
Laiton	75	300	68
Molybdène	565	655	35
Nickel	138	480	40
Titane	450	520	25

Métal / alliage	Module d'élasticité E (GPa)	Module de cisaillement G (GPa)	Coefficient de poisson
Acier	207	83	0.3
Aluminium	69	25	0.33
Cuivre	110	46	0.34
Laiton	97	37	0.34
Magnésium	45	17	0.29
Nickel	207	76	0.31
Titane	107	45	0.34
Tungstène	407	160	0.28

CHAPITRE III

PROPRIETES THERMIQUES

III. PROPRIETES THERMIQUES

III.1. Introduction

Les propriétés thermiques des matériaux sont des grandeurs qui caractérisent le comportement des matériaux lorsqu'ils sont soumis à une variation de température. La connaissance de ces propriétés permet de modéliser les transferts thermiques dans des systèmes complexes et de prédire leurs comportements thermiques. Ces propriétés comprennent entre autres la conductivité thermique, la diffusivité, la capacité thermique, la dilatation thermique et les contraintes thermiques.

Les applications de la connaissance des propriétés thermiques des matériaux, et donc de leurs mesures, couvrent la quasi-totalité de l'activité industrielle : génie des procédés de matériaux (modification des structures et des formes, production d'énergie électrique (centrales thermiques, combustion des matériaux), sidérurgie, métallurgie, génie climatique et bâtiment (production, stockage et isolation du chaud ou de froid), mécanique (résistance des matériaux soumis à des variations ou gradients de température), aérospatial et aéronautique (protection thermique), électronique (propriétés de conduction, protection des composants, capteurs nano- et microélectronique), agriculture et agroalimentaire (production et conservation des aliments, cuisson), environnement (imagerie thermique des sols et des mers), pharmacie (production et conservation), chimie et biologie (synthèse, réactions), médecine (diagnostic et soins), contrôle non destructif des produits (imagerie infrarouge)...

III.2. Introduction aux échanges thermiques

Avant d'entamer les propriétés thermiques, un aperçu global sur la différence entre les grandeurs température et chaleur est nécessaire. La température est une grandeur intensive qui ne dépend pas de la masse de matière alors que l'énergie est une quantité extensive qui dépend de la quantité de matière impliquée.

La température T exprime l'énergie cinétique moyenne d'un système qui dépend de l'état de mouvement de ses particules (atomes, molécules, particules chargées). Plus la température est élevée, plus les particules se déplacent rapidement. La température détermine si l'objet est chaud ou froid. Par conséquent, on peut dire que la température exprime l'énergie interne d'un système.

La chaleur est la modification de l'énergie d'un système faisant intervenir une différence de température avec un autre système, lorsqu'ils sont mis en contact thermique. La chaleur s'écoule toujours du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid. Cette chaleur est l'énergie cinétique totale des particules d'un système. La chaleur exprime l'échange d'énergie entre deux objets en contact.

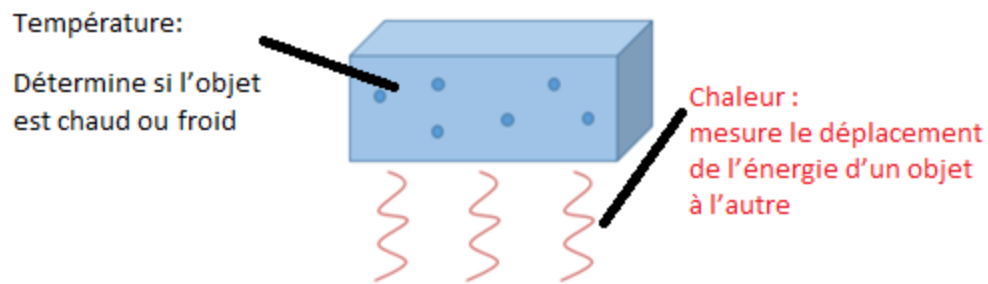


Figure III.1. Chaleur et température

En résumé, la différence principale entre la chaleur et la température réside dans le fait que la chaleur traite l'énergie thermique (macroscopique) échangée par un corps (matériau) avec un autre, alors que la température est plus liée à l'énergie cinétique moléculaire (microscopique) de ce matériau.

III.3. Capacité thermique

La capacité thermique d'un matériau correspond à l'énergie qu'il faut lui apporter pour augmenter sa température d'un (1) degré. La capacité thermique, exprimée en joule par kelvin (J.K^{-1}) et désignée par la lettre « C » en majuscule, traduit l'aptitude d'un matériau à absorber une quantité de chaleur (Q) et à s'échauffer de dT , elle est exprimée par la relation (III.1) :

$$C = \frac{\partial Q}{dT} \dots\dots\dots(\text{III.1})$$

Cette augmentation de température peut se produire soit à volume constant (C_v), soit à pression constant (C_p).

Dans la pratique, on utilise plus souvent la **capacité thermique massique**, désignée par la lettre « c » en minuscule, qui s'exprime en $\text{J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ comme indiquée dans la formule (III.2)

$$c = \frac{C}{m} = \frac{1}{m} \left(\frac{\partial Q}{dT} \right) \dots\dots\dots (\text{III.2})$$

La capacité thermique massique « c » est également appelée **chaleur massique** ou **spécifique** correspond à la quantité de chaleur nécessaire pour faire varier la température de 1 g ou 1 kg d'un corps spécifique de 1 degrés.

Par contre la capacité calorifique molaire exprime la quantité de chaleur nécessaire pour faire varier la température d'une (1) mole d'un corps spécifique d'un (1) degré.

III.3.1. Capacité thermique à volume constant (C_v)

La capacité calorifique à volume constant, C_v , est égale à la dérivée partielle de l'énergie interne par rapport à la température à volume constant (voir la formule III.3) :

$$C_v = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_v \dots\dots\dots (\text{III.3})$$

III.3.2. Capacité thermique à pression constante (C_p)

La capacité calorifique à pression constante, C_p , est égale à la dérivée partielle de l'énergie interne par rapport à la température à pression constante, exprimée par la formule (III.4) :

$$C_p = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_p \dots\dots\dots (III.4)$$

III.3.3. Chaleur massique des solides et liquides

Pour un liquide ou un solide, la chaleur spécifique à pression constante est égale à la chaleur spécifique à volume constant : $C_p = C_v = c$. Ces propriétés thermodynamiques ne dépendent que de la température. Le tableau suivant donne les chaleurs massiques de quelques corps dans les conditions normales de température et de pression : $P = 1 \text{ atm}$ et $T = 0^\circ\text{C}$.

Tableau III.1. Chaleurs massiques de quelques corps dans les conditions standards

Corps	$c \text{ (kJ.K}^{-1}\text{.kg}^{-1}\text{)}$
Argile	0.92
Diamant	0.62
Cuivre	0.37
Verre cristal	0.50
Pierre	0.87
Acétone	2.13
Pétrole	2.13
Alcool éthylique	2.30
Eau de mer	3.93

Pour évaluer c_v , on considère en première approximation que les atomes d'un solide se comportent comme ceux d'un gaz monoatomique porté à la température T , sous l'effet de l'agitation thermique, ces atomes acquièrent une énergie de vibration de $3k_B T$ par atomes ou de $3RT$ par mole.

III.3.4. Chaleur massique d'un gaz

Quand on chauffe un gaz, il peut subir une variation de volume et produire un travail extérieur. Ce travail retire au gaz une quantité d'énergie susceptible d'accroître son échauffement. La quantité de chaleur qu'il faut fournir à une masse m de gaz pour élever sa température est fonction de la manière dont s'effectue l'échauffement. Si la quantité de chaleur Q est fonction des conditions de l'échauffement : il en est donc de même pour la chaleur massique c :

- Si échauffement à volume constant : (Q_v, c_v)
- Si échauffement à pression constante : (Q_p, c_p)

D'où la chaleur massique d'un gaz à volume constant est :

$$c_v = \frac{1}{m} \left(\frac{\partial Q_v}{\partial T} \right) \dots\dots\dots (III.5)$$

La chaleur massique d'un gaz à pression constante est :

$$c_p = \frac{1}{m} \left(\frac{\partial Q_p}{\partial T} \right) \dots\dots\dots (III.6)$$

Le tableau suivant donne les chaleurs massiques C_p de gaz à pression constante dans les conditions atmosphériques normales.

Tableau III.2. Chaleurs massiques de quelques gaz dans les conditions standards

Corps	Température (°C)	C_p (kJ. Kg ⁻¹ . K ⁻¹)
Air sec	0-100	1
Argon	15	0.52
Dioxygène	13-207	0.92
Vapeur d'eau	100	2

A noter que dans le cas des gaz parfaits, les chaleurs massiques c_p et c_v sont indépendantes de la température.

III.4. Effet de la température

Lorsque la température s'élève au-dessus du zéro absolu, tous les atomes d'un solide entrent progressivement en vibration avec une amplitude et une fréquence croissante jusqu'à une température-seuil appelée **température de Debye T_D** (Tableau III.2). Au-dessus de cette température, tous les modes de vibration des atomes étant excités, le nombre de phonons de chaque fréquence croît linéairement avec la température ainsi que l'énergie interne du matériau. La dérivée de cette énergie interne par rapport à la température T , ou **capacité thermique molaire** (J/mol. K), devient alors une constante égale à $3R$, où R est la constante molaire des gaz parfaits.

Pour interpréter la variation de C_v en fonction de la température, il faut faire appel au modèle théorique proposé par Debye (III.7) :

$$T_D = \frac{h\nu_{max}}{k_B} \dots\dots\dots (III.7)$$

h : Constante de Planck

ν_{max} : Fréquence maximale

k_B : Constante de Boltzmann

La température de Debye est également un bon indicateur de la capacité calorifique des solides à basse température ($T_D \gg T$), qui varie selon la loi (III.8) :

$$C_v = \frac{12.\pi^4}{5} R \left(\frac{T}{T_D} \right)^3 \dots\dots\dots (III.8)$$

Avec,

R est la constante des gaz parfait ($R = N.k_B$).

La fréquence de vibration maximale ν_{max} est approximativement déterminée par les relations (III.9) et (III.10) suivantes :

$$v_{max} = \frac{v_s}{\lambda_{min}} \dots\dots\dots (III.7) \quad \text{Où} \quad v_s = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \dots\dots\dots (III.9)$$

v_s : Vitesse du son dans le matériau (m.s^{-1}) ;
 λ_{min} : La longueur d'onde élastique minimale ;
 E : module de Young du matériau (GPa) ;
 ρ : la masse volumique (kg/m^3).

$$T_D = \frac{h}{k_B \cdot \lambda_{min}} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \dots\dots\dots (III.10)$$

Tableau III.2. Caractéristiques thermiques de quelques éléments chimiques purs

Élément chimique	Température de Debye T_D (K)	Capacité thermique massique (kJ/kg.K)
<i>Li</i>	400	2.98
<i>Be</i>	1000	2.42
<i>C (diamant)</i>	1860	1.11
<i>Al</i>	394	0.9
<i>Si</i>	625	0.88
<i>Cr</i>	460	0.45
<i>Fe</i>	420	0.39
<i>Mo</i>	380	0.25
<i>Ag</i>	215	0.22
<i>W</i>	310	0.13
<i>Au</i>	170	0.13
<i>Pb</i>	88	0.12
<i>Bi</i>	120	0.12

III.5. La dilatation thermique

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

Ce fait peut être justifié 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.

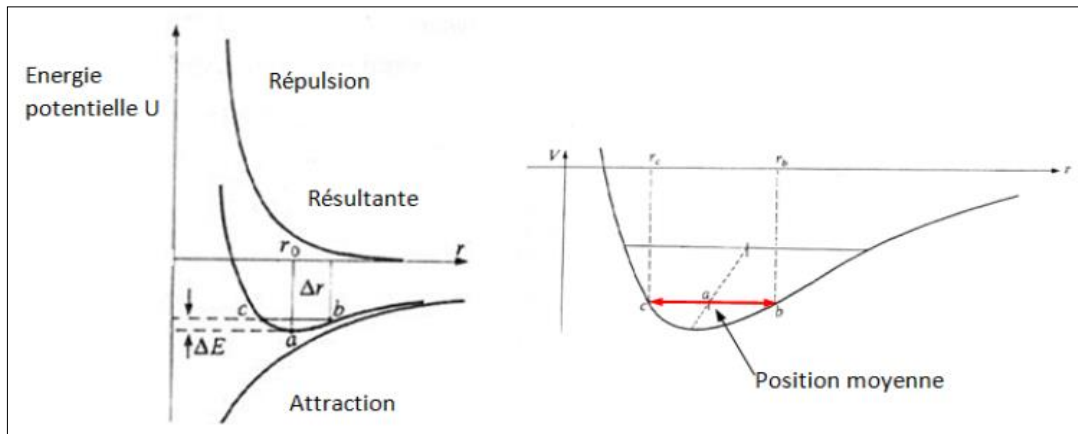


Figure III.1 : Courbe du potentiel de Lennard-Jones

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 degré Kelvin, et ce, 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.

III.5.1. Dilatation thermique des solides

En dehors de ses effets indirects sur les propriétés mécaniques ou sur d'autres propriétés physiques, l'effet le plus direct de l'agitation thermique sur un matériau réside dans **la dilatation thermique**. Elle est due à l'augmentation du volume occupé par les atomes ou les molécules lorsque l'amplitude de leurs vibrations aléatoires augmente avec la température. Pour la plupart des matériaux, elle s'avère proportionnelle à la variation de température.

Dans la pratique, c'est la mesure de la **dilatation thermique linéaire** qui est la plus facile à réaliser et par conséquent, c'est la donnée la plus fréquente qu'on retrouve dans la bibliographie technique. Si on s'intéresse à la dilatation d'un solide de longueur initiale L_0 dans une seule dimension (figure III.2), on mesure l'allongement ΔL observé pour une variation de température ΔT .

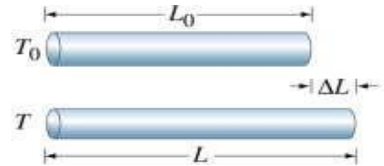


Figure III.2. Dilatation linéaire

Le **coefficient de dilatation thermique linéaire** α (K^{-1}) représente la variation relative de longueur $(L-L_0) / L_0$ produite par une variation de température de 1 K, telle que :

$$\frac{L-L_0}{L_0} = \alpha \cdot \Delta T \rightarrow \gg \gg L = L_0(1 + \alpha \cdot \Delta T) \dots \dots \dots (III.10)$$

Cette formule permet d'obtenir la longueur totale de la tige à toute température.

La valeur de α diffère suivant la classe à laquelle appartient le 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, leur dilatation thermique est élevée.

Si le matériau est macroscopiquement monocristallin et non cubique, on observe des coefficients α 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 la température T augmente.

Si le matériau est **polycristallin** et **isotrope**, le coefficient de dilatation α est unique et ne dépend pas de l'orientation. On aura alors :

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{3 \cdot \Delta L}{L_0} \dots \dots \dots (III.11)$$

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 α suivant plusieurs directions.

III.5.2. Dilatation thermique des liquides

Comme les solides, les liquides subissent aussi des dilatations thermiques quand on les chauffe. Il faut noter que les liquides épousent la forme du récipient dans lequel ils se trouvent, la dilatation thermique du liquide est une fraction du volume initialement rempli. La

dilatation thermique des liquides est aussi utilisée pour les thermomètres et dans la fabrication de commutateurs (thermostats) dépendant de la température.

Lorsqu'ils sont soumis à une élévation de température, les molécules accumulent de l'énergie sous forme cinétique (le mouvement de translation) et de rotation : les liquides augmentent de volume. L'accumulation d'énergie avec la température augmente l'importance du mouvement brownien. Il en résulte une dilatation du volume. On dira que le liquide possède un coefficient de dilatation thermique. Ce coefficient exprime l'augmentation ΔV d'un volume V pour une élévation de 1 °C. Ou encore :

$$V = V_0(1 + \beta \cdot T) \dots\dots\dots (\text{III.12})$$

Avec :

V : Volume à la température T ,

V_0 : Volume initial à 0 °C,

β : Coefficient de dilatation thermique volumique (°C⁻¹),

T : Température (°C)

Le liquide le plus important en construction, dont nous devons connaître la capacité de dilatation, est l'eau. Le coefficient de dilatation de l'eau varie fortement en fonction de la température comme indiqué dans le tableau III.3.

Tableau III.3 : Dilatation thermique de l'eau à l'état liquide

Température (°C)	Densité	Coefficient de dilatation thermique (°C ⁻¹)
10	0.9997	$6,0 \cdot 10^{-5}$
20	0.9982	$1,5 \cdot 10^{-4}$
40	0.9922	$3,0 \cdot 10^{-4}$
80	0.9718	$5,84 \cdot 10^{-4}$
100	0.9543	$6,82 \cdot 10^{-4}$

Quand on mesure la dilatation d'un liquide dans un récipient, on prend en compte la dilatation du liquide (dilatation absolue), mais aussi la dilatation du solide constituant le récipient : on observe la dilatation apparente du liquide.

Au cours de l'élévation de température, la variation :

- Du volume du récipient : $\Delta V_{\text{rec}} = V_0 k \cdot \Delta T$
- Du volume du liquide : $\Delta V_{\text{liq reel}} = V_0 \beta \cdot \Delta T$
- Apparente du volume liquide : $\Delta V_{\text{app liq}} = V_0 \beta' \cdot \Delta T$

Les trois variations sont liées par : $\Delta V_{\text{app liq}} = \Delta V_{\text{liq reel}} - \Delta V_{\text{rec}}$

On obtient :

$$\beta' = \beta - k$$

Exemple

Un ballon de verre de 50000 cm³ est rempli de mercure à 18 °C. Quel volume de mercure débordera du ballon si la température est portée à 38 °C ?

β' (verre) = $7.10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$; β (mercure) = $17.10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

III.6. La conductibilité thermique

La **conductibilité thermique** caractérise le transfert de chaleur à travers un matériau, d'une région chaude vers une région froide. Elle est définie par loi (III.12) suivante :

$$Q = -k \cdot \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots \text{(III.12)}$$

Où Q (W/m²) est le flux thermique et dT/dx (K/m) le gradient de température. Comme cette conductibilité est essentiellement due à l'agitation électronique, elle varie comme le libre parcours moyen des électrons et est beaucoup plus élevée pour les métaux que pour les autres matériaux. Elle est également très sensible à la température.

Le coefficient de conductibilité thermique k est exprimé en (W/m.K).

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/m², au gradient de température comme décrit ci-dessus.

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 n'est pas abordé dans ce manuscrit.

III.7. Modes de transfert de chaleur

La chaleur est une sorte d'énergie qui voyage de trois manières différentes : **conduction**, **convection** et **rayonnement**. La figure III.3 met en évidence les trois modes de transfert de chaleur.

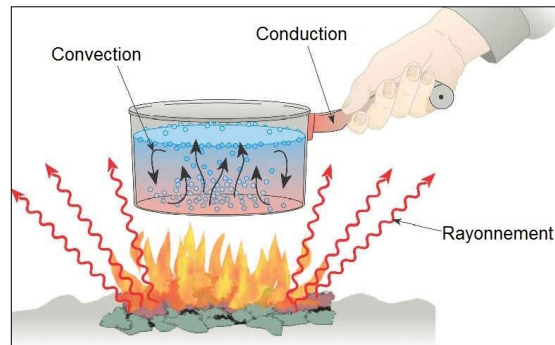


Figure III.3. Modes de transfert de chaleur

Tableau III.3. Caractéristiques thermiques de quelques matériaux à 20 °C.

Matériau	Coefficient de dilatation linéaire ($10^{-6}/K$)	Capacité thermique massique (kJ/kg.K)	Conductibilité thermique (W/m.K)
Métaux			
<i>Acier au carbone</i>	10 à 15	0.48	47
<i>Acier allié</i>	12	0.51	13 à 48
<i>Acier inoxydable</i>	11 à 16	0.51	16 à 26
<i>Aluminium</i>	24	0.9	220 à 230
<i>Aluminium, alliage</i>	20 à 24	0.84	120 à 200
<i>Cuivre</i>	17	0.39	370
<i>Cuivre, alliage</i>	16 à 20	0.39	30 à 160
<i>Etain</i>	23	0.23	67
<i>Fer</i>	12	0.44	81
<i>Fonte</i>	10 à 11	0.27 à 0.46	44 à 53
<i>Magnésium et alliage</i>	25 à 27	1.02	80 à 156
<i>Nickel</i>	13	0.44	92
<i>Nickel alliage</i>	10 à 19	0.48 à 0.5	11 à 30
<i>Titane</i>	8	0.52	22
<i>Zinc</i>	40	0.39	116

Matériau	Coefficient de dilatation linéaire (10⁻⁶/K)	Capacité thermique massique (kJ/kg.K)	Conductibilité thermique (W/m.K)
<i>Céramiques et minéraux</i>			
Alumine Al₂O₃	8 à 9	0.7	20 à 40
Carbone diamant	0.8 à 1.2	0.5	200 à 400
Carbone graphite	0.5 à 6.5	0.7 à 1.1	5 à 250
Carbures	4 à 6	0.2 à 1	40 à 120
Glace H₂O (0 °C)	50 à 60	2.1	2.1
Verres	3 à 9	0.5 à 0.7	0.5 à 2
Zircone (ZrO₂)	2.3 à 12.2	0.42 à 0.54	1.7 à 2.7
<i>Polymères et élastomères</i>			
Caoutchouc naturel	22	1.9	0.18
Nylon (Polyamide 6-6)	80 à 150	1.6	0.17 à 0.25
Polychlorure de vinyle (PVC)	50 à 250	0.8 à 1.7	0.12 à 0.3
Polyéthylène (PE)	110 à 200	1.9 à 2.3	0.25 à 0.35
Polymétacrylate de methyle (PMMA)	50 à 90	1.46	0.17 à 0.25
Polytetrafluoréthylène (PTFE)	100	1.05	0.25
Résine époxyde (EP)	60	1.1	0.17
<i>Composites</i>			
Béton	7 à 14	3.3	0.1 à 2
Bois (perpendiculaire au fil)	14 à 21	1.6 à 1.7	0.04 à 0.06
Bois (parallèle au fil)	2 à 11	1.6 à 1.7	0.2 à 0.4
Epoxyde-Fibre de carbone	5 à 20	1.2 à 1.5	0.4 à 1.2
Polyester-Fibre de verre	12 à 25	1 à 1.4	0.4 à 1.2

CHAPITRE IV
PROPRIETES ELECTRIQUES

IV. LES PROPRIETES ELECTRIQUES

IV.1. Introduction

La propriété électrique fait référence à la réponse d'un matériau à un champ électrique appliqué. L'une des principales caractéristiques des matériaux est leur capacité (ou leur incapacité) à conduire le courant électrique. En effet, les matériaux sont classés selon cette propriété, c'est-à-dire qu'ils sont divisés en conducteurs, semi-conducteurs et non-conducteurs (isolants).

La conduction électrique d'un matériau dépend de la mobilité des électrons (ou des ions) qu'il contient dans le champ électrique extérieur imposé. Cette mobilité dépend de la structure électronique et donc de la nature des atomes constituant le matériau. Etant donné que, seuls les électrons dont l'énergie est supérieure au niveau de **Fermi** peuvent participer à la conduction, celle-ci est forte pour les matériaux métalliques (conducteurs), faible ou inexistante pour les matériaux organiques et minéraux (diélectriques).

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

IV.2. Notions de base

L'atome est électriquement neutre à l'état d'équilibre. La masse de l'électron est négligeable devant celle du proton ou du neutron. Les orbites des électrons occupent dans un atome des couches successives, correspondant à des niveaux d'énergie discrets, qui deviennent des **bandes** dans les solides regroupant plusieurs atomes. Ces niveaux ne peuvent contenir qu'un nombre limité d'électrons : deux pour le premier, huit pour les niveaux suivants (du moins lorsqu'ils se trouvent en position externe), et ils sont séparés par des **bandes interdites**. On appelle **énergie de Fermi** de l'atome considéré la limite supérieure du remplissage des états d'énergie électroniques à l'équilibre thermodynamique et au zéro absolu.

Les propriétés chimiques d'un élément proviennent essentiellement de ses électrons, et en particulier de ceux de la couche externe, appelés **électrons de valence** ; ces propriétés sont donc liées au groupe (colonne du tableau de classification périodique) auquel il appartient.

Isotopes : sont des éléments possédant le même numéro atomique (donc les mêmes propriétés électroniques et chimiques), mais des masses atomiques différentes, en raison d'un nombre différent de neutrons. Dans la nature, certains éléments chimiques existent sous forme de mélanges d'isotopes ; ceci entraîne des valeurs de masses atomiques moyennes non entières.

Propriétés des groupes : Les éléments du groupe VIII, appelés **gaz rares**, sont caractérisés par une couche externe complète ; ceci leur confère une stabilité chimique exceptionnelle. Les éléments du groupe I A ne possèdent qu'un seul électron sur leurs couches externes : ils ont tendance à s'en défaire pour avoir une couche extérieure saturée et donner des ions positifs ou **cations**. Cette tendance s'étend aussi à tous les éléments de la partie gauche du tableau périodique, appelés **métaux**, qui sont tous donneurs d'électrons. Les éléments du groupe VII A possèdent sept électrons sur leurs couches externes : ils ont tendance à la compléter en captant un électron disponible dans leur voisinage pour donner des ions négatifs ou **anions**. Cette tendance s'étend aussi à certains éléments de la partie droite du tableau, appelés **non-métaux**, tous accepteurs d'électrons. Certains éléments situés

à la limite entre ces deux zones présentent des caractères mixtes, variables selon le champ électrique auquel ils sont soumis (ils sont semi-conducteurs). La Figure IV.1 illustre ces différences de comportement par les structures de bandes de ces divers types d'atomes.

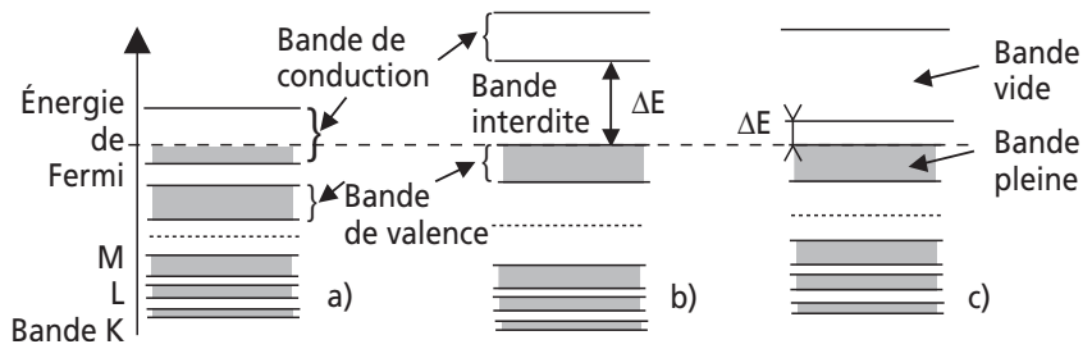


Figure IV.1. Schémas des structures de bandes. a) d'un amas d'atomes de métal (la bande de conduction comporte des états disponibles) ; b) d'un amas d'atomes de non-métal (la bande interdite a une largeur ΔE importante) ; c) d'un amas d'atomes de semi-conducteur (la bande interdite a une largeur faible).

IV.2.1. Théorie des bandes

La théorie des bandes est un modèle quantique en physique des solides qui détermine les énergies possibles des électrons dans un solide et permet de comprendre la notion de conductivité électrique. Il est issu de la théorie des orbitales moléculaires.

Dans le cas des solides, qui représentent l'état le plus dense de la matière, un électron destiné à former une liaison entre deux atomes particuliers a, dans son proche voisinage, un grand nombre d'autres centres atomiques qui l'attirent. L'effet conjoint de ces très nombreuses interactions modifie les niveaux d'énergie des différentes orbitales.

On constate que le niveau d'énergie très précis qui caractérisait l'orbitale considérée dans l'atome isolé s'est transformé en une bande d'énergie de largeur Δ .

Cette grandeur dépend du nombre et de la nature des voisins proches de l'atome cible.

Le nombre des atomes plus proches voisins est en relation avec le type de structure du solide (est-il amorphe ou cristallisé ? S'il est cristallisé, quelle est la compacité de son système cristallin ?).

La nature de ces voisins désigne l'effet de la composition et de la nature de la liaison (s'agit-il d'une solution solide ou d'un composé ?)

Les bandes internes de forte énergie sont très étroites car elles affectent des orbitales profondes, fortement liées au noyau et peu sensibles aux interactions des atomes voisins.

La bande de plus faible énergie correspond aux orbitales les plus externes, d'où il est le plus facile d'extraire des électrons sous l'effet de l'agitation thermique, par exemple. C'est la bande de conduction, car c'est de cette bande que proviendront les électrons responsables de la conduction électrique et thermique du solide.

Enfin, la bande intermédiaire, dite bande de valence, contient des électrons liés à l'atome mais qui pourront éventuellement « sauter » dans la bande de conduction.

La bande de conduction commence à l'énergie E_c . Quant à la bande de valence, elle s'arrête à l'énergie E_v . Entre les deux, est représentée la bande interdite, de largeur E_g (g pour « gap »), dont dépendra la caractéristique de conducteur ou d'isolant du matériau.

Dans le cas d'un matériau isolant, la bande de conduction est complètement occupée et la bande de conduction est vide. Sous l'effet de l'agitation thermique, des électrons peuvent acquérir une énergie plus élevée mais l'ampleur de la bande interdite, E_g , est telle qu'aucun ne réussira à venir occuper la bande de conduction.

Selon leur structure électronique, les matériaux présentent plusieurs possibilités de configuration des bandes de valence, de conduction et de bande interdite.

La Figure IV.2 ci-dessous montre les différents cas possibles :

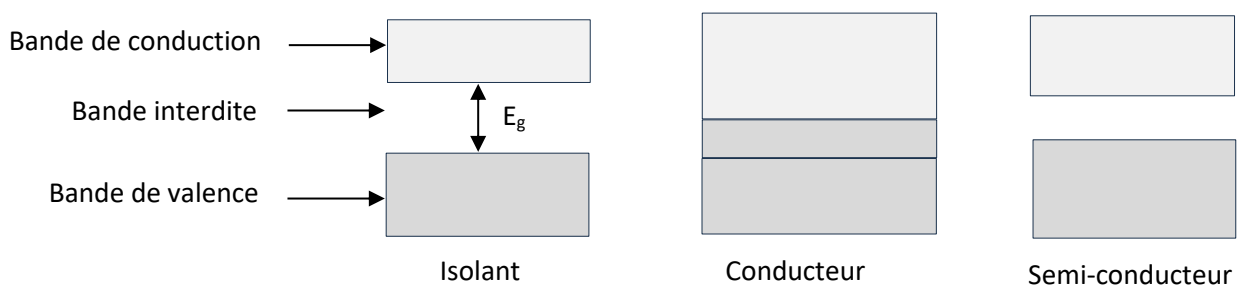


Figure IV.2. Plusieurs possibilités de configuration de bandes de valence.

C'est le cas du carbone diamant, dont les liaisons covalentes très fortes retiennent tous les électrons disponibles. Aucun électron ne deviendra électron de conduction et le diamant est donc l'isolant électrique (presque) parfait.

Dans le cas des matériaux conducteurs, la bande de valence n'est pas totalement occupée et la bande de conduction la recouvre partiellement. Il n'y a pas de bande interdite et des électrons de valence peuvent facilement passer dans la bande de conduction par agitation thermique.

Enfin, les matériaux semi-conducteurs représentent un cas particulier des isolants. Leur bande interdite est de largeur suffisamment faible pour que certains électrons de la bande de valence puissent passer par agitation thermique ou excitation dans la bande de conduction.

En passant dans la bande de conduction, l'électron devient mobile comme dans un conducteur mais il laisse un « trou », qui est un porteur de charge positive, dans la bande de valence. Sous l'effet d'un champ électrique externe, électrons de conduction et trous se déplaceront dans une direction opposée et participeront ensemble à la conduction dans ces matériaux.

La propriété de conduction de l'électricité, ou son contraire, est essentielle pour de très nombreuses réalisations industrielles. Les applications sont bien connues : transport de l'énergie électrique, chauffage, mais aussi phénomènes variés dans les circuits « électroniques ».

IV.3. Résistivité et conductivité électriques

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 :

$$V = I \times R \dots\dots\dots (IV.1)$$

La résistivité électrique ρ ($\Omega \cdot m$) d'un matériau ou son inverse la conductivité (ou conductibilité) électrique ($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$), traduit la mobilité des électrons de conduction créant une densité de courant J (ampères/m²) dans un champ électrique E (volt/m) :

$$E = \rho \times J = J/\sigma \dots\dots\dots (IV.2) ; \quad \sigma = 1/\rho \dots\dots\dots (IV.3)$$

La résistance électrique R (Ω) d'un conducteur de longueur l et de section S s'écrit selon l'équation (IV.4) suivante :

$$R = \rho \times (l/S) \dots\dots\dots (IV.4)$$

La résistance R , est d'autant plus élevée que la longueur l parcourue par les charges électriques est grande et que l'aire S de la section à travers laquelle les charges circulent est petite.

La résistivité ρ est extrêmement sensible à la pureté et à la composition. De même, au-dessus de 0,2 fois la température de Debye d'un solide considéré, sa résistivité augmente linéairement avec la température en raison de l'augmentation des chocs entre les électrons, les ions et le nombre croissant d'imperfections du réseau. Lorsque la température s'abaisse, la résistivité tend vers une limite finie, sauf pour quelques matériaux qui deviennent **supraconducteurs** (supraconductivité) : au-dessous d'une température dite critique, leur résistivité s'annule en raison de mouvements coopératifs des électrons.

Le Tableau IV.1 donne quelques ordres de grandeur de ces deux propriétés pour quelques matériaux de composition chimiques différentes.

Tableau IV.1. Résistivité (ρ) et conductivité électrique (σ) de quelques matériaux

Matériau	ρ ($\Omega \cdot m$)	σ ($\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$)	Observations
Plastique	10^{20}	10^{-20}	Mauvais conducteur = isolant
Verre	10^{17}	10^{-17}	Mauvais conducteur = isolant
Semi-conducteurs	10^{-4} à 10^6	10^{-6} à 10^4	Conductibilité intermédiaire
Métaux	10^{-8} à 10^{-5}	10^5 à 10^8	Très bons conducteurs

Les valeurs de la résistivité couvrent plusieurs ordres de grandeur, depuis $10^{-8} \Omega \cdot m$ pour les métaux jusqu'à $10^{17} \Omega \cdot m$ pour les polymères (Voir tableau IV.3).

IV.3.1. 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 ρ varie linéairement selon la formule (IV.5) :

$$\rho = \rho_0[1 + \beta(T - T_0)] \dots\dots\dots (IV.5)$$

Où :

ρ_0 est la résistivité à T_0

β le coefficient thermique.

Tableau IV.2. Résistivités et coefficients thermiques de quelques métaux

Métal	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	4.10^{-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	$5.8 \cdot 10^{-8}$	$4.1 \cdot 10^{-3}$

La variation de la résistivité électrique du cuivre pur et avec inclusions en fonction de la température est illustrée dans la Figure IV.3.

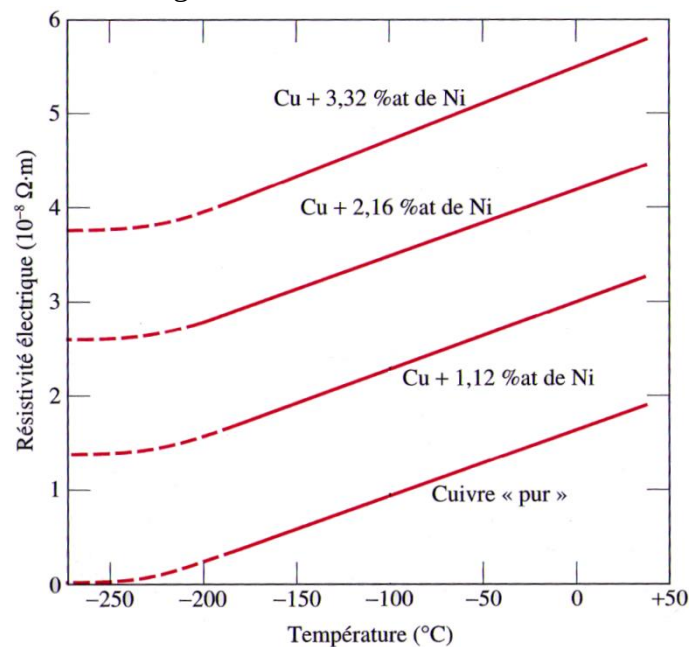


Figure IV.3. : Résistivité électrique du cuivre et alliages du Cu en fonction de la température

Nous pouvons tirer de la figure IV.3 que la résistivité est influencée par :

- La température ;

- La composition du matériau ;
- ρ des alliages $>$ ρ des métaux.

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.

A noter que la conductibilité du cuivre recuit de haute pureté ($0,580.10^8 \Omega^{-1}.m^{-1}$) est prise par convention comme valeur de référence égale à 100 % IACS (*International Annealed Copper Standard*).

IV.4. Permittivité électrique

Un matériau sans électrons de conduction (diélectrique, à résistivité élevée) contient néanmoins des charges électriques localisées (électrons, protons ou ions) susceptibles de se déplacer à courte distance sous l'effet d'un champ électrique extérieur E , provoquant ainsi une **polarisation** du matériau. La **permittivité électrique** ϵ (F/m) caractérise cette polarisabilité.

Un condensateur dont les deux plaques d'aire A sont séparées par une épaisseur e de vide, de permittivité de référence $\epsilon_0 = 8,854.10^{-12}$ F/m, possède une capacité $C = \epsilon_0 \times A/e$. Un condensateur dont les deux plaques sont séparées par un matériau diélectrique de permittivité ϵ voit sa capacité augmentée dans le rapport $\epsilon/\epsilon_0 = \epsilon_r = (1 + \chi)$. ϵ_r est la **permittivité relative** ou **constante diélectrique**, χ est la **susceptibilité électrique** du matériau. En cas de champ électrique alternatif, la permittivité varie avec la fréquence d'oscillation par dissipation d'énergie sous forme thermique lors du déplacement des charges à chaque cycle. Cette proportion d'énergie dissipée est caractérisée par un **facteur de perte**.

Une autre caractéristique importante dans les applications des isolants est leur **tension de claquage**. Elle représente la valeur maximale de tension, en V/m, à partir de laquelle un arc électrique peut être généré dans le matériau par une éjection en avalanche des électrons de la bande de conduction.

IV.5. Ferroélectricité et piézoélectricité

Les matériaux **ferroélectriques** possèdent une polarisation électrique naturelle et permanente en raison d'une structure où les barycentres des charges négatives et positives ne coïncident pas dans la maille élémentaire (par exemple le titanate de baryum $BaTiO_3$). Dans les cristaux, les dipôles électriques ainsi constitués sont tous orientés dans la même direction à l'intérieur de **domaines** ferroélectriques séparés de leurs voisins par des **parois**. En l'absence de champ électrique extérieur, les directions de polarisation de ces domaines sont aléatoires et la polarisation résultante est nulle. Sous champ, les domaines dont l'orientation dipolaire est proche de celle du champ imposé s'étendent aux dépens de leurs voisins par migration des parois.

Comme ils possèdent des constantes diélectriques très élevées, ces matériaux ferroélectriques sont fréquemment utilisés dans les condensateurs, en dépit de leur facteur de perte élevé dû à une importante hystérésis de polarisation.

Dans les matériaux **piézoélectriques**, comme le quartz, ce sont les déformations élastiques de la maille cristalline sous contrainte qui provoquent la polarisation électrique par décalage des barycentres des charges positives et négatives. Inversement, l'application d'un champ électrique provoque une polarisation induite qui s'accompagne d'une déformation élastique du cristal. Ces particularités permettent d'utiliser les cristaux piézoélectriques soit comme capteurs électriques de pression, soit comme actionneurs électromécaniques. On peut, en particulier, en faire des émetteurs ou des récepteurs d'ondes ultrasonores entre 0,5 MHz et 5 GHz.

Tableau IV.3 : Résistivité des matériaux à 20 °C

Matériau	Résistivité à 20 °C ($\Omega \cdot m$)
Métaux et alliages	
Acier au carbone	$1,6 \cdot 10^{-7}$
Acier inoxydable	$7,0 \cdot 10^{-7}$
Aluminium, pureté commerciale	$2,65 \cdot 10^{-8}$
Aluminium, alliage 2024	$3,4 \cdot 10^{-8}$
Argent, pureté commerciale	$1,47 \cdot 10^{-8}$
Cuivre, pureté commerciale	$1,71 \cdot 10^{-8}$
Cuivre, alliage Cu-45% Ni	$4,9 \cdot 10^{-7}$
Etain, pureté commerciale	$1,1 \cdot 10^{-7}$
Etain, alliage de brasure 60% Sn-40 %Pb	$1,5 \cdot 10^{-7}$
Fer, pureté commerciale	$9,7 \cdot 10^{-8}$
Laiton Cu-20 % zinc	$5,4 \cdot 10^{-8}$
Nickel, pureté commerciale	$7,0 \cdot 10^{-8}$
Or, pureté commerciale	$2,35 \cdot 10^{-8}$
Platine, pureté commerciale	$10,6 \cdot 10^{-8}$
Titane, pureté commerciale	$5,0 \cdot 10^{-7}$
Tungstène, pureté commerciale	$5,65 \cdot 10^{-8}$
Zinc, pureté commerciale	$6,2 \cdot 10^{-6}$
Semi-conducteurs (résistivité intrinsèque)	
Arséniure de gallium (GaAs)	10^6
Germanium	10^2
Silicium	$2,5 \cdot 10^3$
Céramiques et minéraux	
Alumine Al_2O_3 (99,9%)	$> 10^{13}$
Carbure de silicium SiC	1 à 10^9
Diamant (synthétique)	$1,5 \cdot 10^{-2}$

Tableau IV.4 : Caractéristiques de matériaux diélectriques

Matériau	Permittivité relative ϵ_r (à 10^6 Hz)	Facteur de perte	Tension de claquage (10^6 V/m)
Milieus de référence			
Vide élevé	1	0	100
Air sec (p_{atm})	1	$< 10^{-5}$	2
Hexafluorure de soufre SF_6 (p_{atm})	1,1	$< 10^{-5}$	7
Eau	80	$\approx 0,1$	
Hydrocarbures chlorés	4 à 6	$1 \text{ à } 4 \cdot 10^{-5}$	50 à 100
Céramiques et minéraux			
Alumine Al_2O_3	4,5 à 9	$2 \cdot 10^{-3}$	6
Mica	7	10^{-3}	40
Porcelaine	6 à 8	$3 \cdot 10^{-3}$ à $2 \cdot 10^{-2}$	3 à 50
Titanates	15 à 12 000	$2 \cdot 10^{-3}$	2 à 12
Verre sodo-calcique	7	10^{-2}	300 à 500
Zircone ZrO_2	7 à 10	$3 \cdot 10^{-3}$ à $2 \cdot 10^{-2}$	3 à 50
Polymères et élastomères			
Caoutchouc naturel	3 à 4	10^{-2} à 10^{-3}	12 à 24
Nylon (Polyamide 6-6)	3 à 4	10^{-2} à 10^{-3}	10 à 20
Polychlorure de Vinyle (PVC)	3 à 9	10^{-1} à 10^{-2}	5 à 40
Polyéthylène (PE)	2,3	10^{-4}	16 à 40
Polytétrafluoréthylène (PTFE)	2 à 3	10^{-4}	16
Résine époxyde (EP)	3,6	$2 \cdot 10^{-2}$	18

IV.6. Concept de la masse effective

Considérons un cristal soumis à une différence de potentiel, un électron de conduction du cristal est soumis d'une part à une force interne $\vec{F}_i$ résultant du champ cristallin et d'autre part une force d'origine externe $\vec{F}_{ext}$ résultant du champ électrique appliqué. L'équation de la dynamique s'écrit pour l'électron :

$$m_0 \vec{\gamma} = m_0 \frac{d\vec{V}}{dt} = \vec{F}_i + \vec{F}_{ext} \quad \dots\dots\dots (IV.6)$$

D'où

$$\vec{F}_{ext} = \vec{\gamma} \left(m_0 - \frac{F_i}{\gamma} \right) = m^* \vec{\gamma} \quad \dots\dots\dots (IV.7)$$

On introduit une particule fictive de masse m^* (seulement intervient la force extérieure). La masse effective m^* contient en quelque sorte l'inertie additionnelle que donne à l'électron le potentiel cristallin (contient l'effet global du potentiel cristallin sur l'électron). L'électron dans un état k est représenté par un paquet d'onde centré sur la pulsation ω_k . La vitesse de cet électron est :

$$\vec{V}_g = \frac{d\omega}{dk} \vec{u} \Rightarrow V_g = \frac{1}{\hbar} \frac{dE}{dk}, \text{ avec } E = \hbar \omega_k \quad \dots\dots\dots (IV.8)$$

L'accélération de cet électron est alors donnée par :

$$\gamma = \frac{dV}{dt} = \frac{1}{\hbar} \frac{d}{dt} \left(\frac{dE}{dk} \right) = \frac{1}{\hbar} \frac{d}{dk} \left(\frac{dE}{dt} \right) \quad \dots\dots\dots (IV.9)$$

En mécanique classique, si une particule est soumise à une force $\vec{F}$ pendant un intervalle de temps dt , la variation de son énergie cinétique est donnée par :

$$dE = \vec{F} \cdot \vec{V} dt \Rightarrow \frac{dE}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{V} \quad \dots\dots\dots (IV.10)$$

On obtient :

$$\gamma = F \frac{1}{\hbar^2} \frac{d^2 E}{dk^2} \quad \dots\dots\dots (IV.11)$$

Ce qui s'écrit : $F = m^* \gamma$, avec,

$$m^* = \frac{h^2}{\frac{d^2 E}{dk^2}} \dots\dots\dots (IV.12)$$

La masse effective des électrons apparaît donc comme inversement proportionnelle à la dérivée seconde de la courbe de dispersion $E(k)$, c'est-à-dire à la courbure des bandes d'énergies dans l'espace des k .

Dans le cas d'un cristal tridimensionnels, les résultats se compliquent, la masse effective devient un tenseur :

$$\left(\frac{1}{m^*}\right)_{ij} = \frac{1}{h^2} \frac{\partial^2 E(k)}{\partial k_j \partial k_i} \dots\dots\dots (IV.13)$$

Soit explicitement :

$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{h^2} \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 E}{\partial k_x^2} & \frac{\partial^2 E}{\partial k_x \partial k_y} & \frac{\partial^2 E}{\partial k_x \partial k_z} \\ \frac{\partial^2 E}{\partial k_y \partial k_x} & \frac{\partial^2 E}{\partial k_y^2} & \frac{\partial^2 E}{\partial k_y \partial k_z} \\ \frac{\partial^2 E}{\partial k_z \partial k_x} & \frac{\partial^2 E}{\partial k_z \partial k_y} & \frac{\partial^2 E}{\partial k_z^2} \end{pmatrix} \dots\dots\dots (IV.14)$$

Ce concept de masse effective est très utile puisqu'il permet de traiter la dynamique de l'électron quasi-libre dans un cristal en utilisant les lois de la mécanique classiques, à condition de remplacer la masse au repos de l'électron par sa masse effective. On peut interpréter cette grandeur comme représentant toutes les interactions de l'électron avec son environnement cristallin. On notera que, alors que la vitesse de groupe était proportionnelle à la **pente** de la courbe $E(k)$, la masse effective est inversement proportionnelle à la **courbure** de cette bande. Ainsi,

- ✓ $m^* < 0$ au voisinage d'un maximum de $E(k)$,
- ✓ $m^* > 0$ au voisinage d'un minimum de $E(k)$.

Autrement dit, dans un cristal, l'accélération de l'électron n'est pas forcément colinéaire à la force appliquée, et peut même être de sens opposé.

Remarque

En général, on exprime la masse effective m^* d'un porteur en fonction de la masse m_e ($\approx 9.1 \cdot 10^{-31}$ kg) de l'électron.

Ex : Pour le GaAs, la masse effective de l'électron vaut : $m^* = 0.067 m_e$

SERIE D'EXERCICES D'APPLICATION

Exercice 1

Soient les configurations électroniques de quelques éléments qui vous seront utiles :

H : $1S^1$

He : $1S^2$

Li : $1S^2 2S^1$

Be : $1S^2 2S^2$

C : $1S^2 2S^2 2P^2$

O : $1S^2 2S^2 2P^4$

F : $1S^2 2S^2 2P^5$

Na : $1S^2 2S^2 2P^6 3S^1$

Mg : $1S^2 2S^2 2P^6 3S^2$

Al : $1S^2 2S^2 2P^6 3S^2 3P^1$

Si : $1S^2 2S^2 2P^6 3S^2 3P^2$

Cl : $1S^2 2S^2 2P^6 3S^2 3P^5$

Ti : $1S^2 2S^2 2P^6 3S^2 3P^6 3d^2 4S^2$

Zn : $1S^2 2S^2 2P^6 3S^2 3P^6 3d^{10} 4S^2$

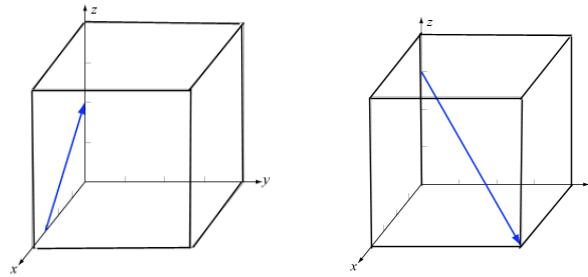
Br : $1S^2 2S^2 2P^6 3S^2 3P^6 3d^{10} 4S^2 4P^5$

Sr : $1S^2 2S^2 2P^6 3S^2 3P^6 3d^{10} 4S^2 4P^5 5S^2$

1. Quelle classe de matériaux ne contient jamais de liaison covalente : les métaux, les polymères ou les céramiques ?
2. Lequel de ces atomes ne peut pas former de liaison forte : l'hydrogène, l'hélium ou le lithium ? Pourquoi ?
3. Quelle liaison chimique se retrouve en grande quantité dans les céramiques et les polymères ?
4. Quelles sont les configurations électroniques du zinc et de l'oxygène dans l'oxyde de zinc ZnO ? De quelle classe de matériaux celui-ci fait-il partie ? Citer deux de ses propriétés.
5. Quel est le nombre de moles n contenu dans une masse m d'oxyde de zinc, connaissant les masses molaires du zinc et de l'oxygène M_{Zn} et M_O et le nombre d'Avogadro N_A ?
A.N. : $m = 10$ g, $M_{Zn} = 65,4$ g/mol, $M_O = 16,0$ g/mol et $N_A = 6,02 \times 10^{23}$ at/mol.
6. Quel(s) type(s) de liaison l'atome de sodium est-il susceptible de former ? Même question pour le chlore ?
7. Quelle liaison un atome de strontium et un atome de brome sont-ils susceptibles de former ? Quelle est leur structure électronique une fois la liaison formée ? Quelle est la formule chimique du composé ? De quelle classe de matériaux celui-ci fait-il partie ?
8. Quelle est la valence du carbone dans le diamant, de l'ion niobate dans le niobate de lithium ($LiNbO_3$, cristal à liaison ionique) et du béryllium dans le béryllium métallique ?
9. Donner la valence des atomes dans les molécules SiO_2 , Al_2O_3 et $TiCl_2$.
10. Quel type de liaison devrait-on s'attendre à rencontrer dans les matériaux suivants : le laiton, le caoutchouc, le xénon solide, le bronze, le nylon, la magnésie (MgO), le silicium cristallin ?

Exercice 2

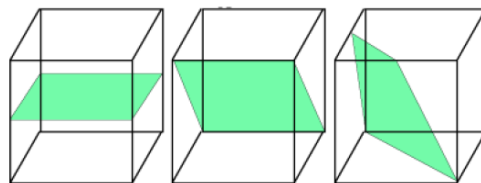
1/ Donnez le symbole de la zone de chaque vecteur représenté sur les deux figures suivantes :



2/ Représenter ces directions réticulaires sur une maille cubique ? (Remarque : Les directions doivent être représentées à l'intérieur des cubes).

$[010]$; $[011]$; $[111]$; $[021]$; $[\bar{2}12]$; $[\bar{1}10]$; $[110]$; $[0\bar{2}1]$

3/ Déterminer les indices de Miller des plans représentés sur les figures suivantes ?

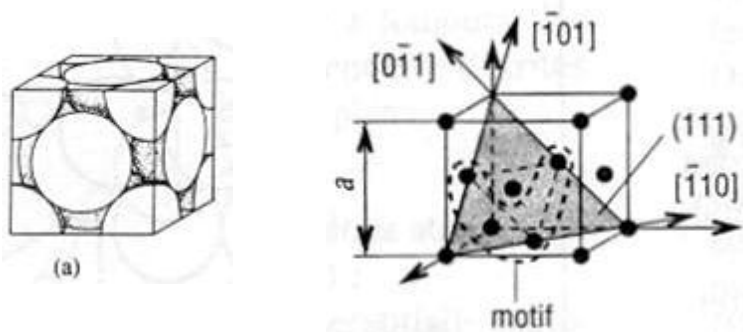


4/ Représenter les plans d'indices de Miller suivants (Remarque : Les plans doivent être situés à l'intérieur des cubes) ?

(100) ; (001) ; (011) ; (101) ; (111) ; (201) ; (221) ; (110) ; $(4\bar{1}2)$; $(\bar{1}11)$.

Exercice 3

1/ Soit un système cubique à face centrées (CFC) de paramètre de maille a



1.1/ Déduire le rayon atomique R_a ?

1.2/ Calculez la compacité $C\%$ de ce système ? Sachant que la compacité est le rapport du volume des atomes de la maille sur le volume de la maille ?

2/ Le sodium cristallise suivant un empilement cubique centré de paramètre de maille a .

2.1/ Dessiner la maille usuelle en représentant les atomes de sodium par des points. Dénombrer le nombre Z d'atomes par maille. ?

2.2/ Quel est le rayon atomique R du sodium ?

2.3/ Quelle est la masse volumique ρ du sodium ?

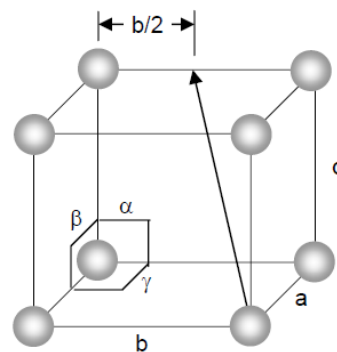
$$a = 0,43 \text{ nm} ; N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1} ; M_{\text{Na}} = 23 \text{ g/mol}$$

Exercice 4

Considérez la maille élémentaire du polonium (Po) représentée ci-dessous. Bien entendu, dans le cristal réel, les atomes de polonium se touchent.

Le motif associé à cette maille est constitué d'un atome sphérique de rayon R et les paramètres de la maille sont tels que :

$$a = b = c = 0,3354 \text{ nm} \quad \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ :$$



- 1/ Déterminez la compacité de cette maille ?
- 2/ Donnez le nom du site situé au centre de la maille ?
- 3/ Exprimez, en fonction du rayon R des atomes de polonium, le rayon r de ce site ?
- 4/ Dans le cas où ce site est occupé par un autre atome, quel est alors le réseau de Bravais ? Justifiez votre réponse ?
- 5/ Calculez la compacité de cette maille dans le cas où des atomes de polonium s'insèrent sur les six faces de la maille ?
- 6/ Indexez la direction dessinée sur la figure ci-dessus ?
- 7/ Dans la maille donnée, dessinez les plans $(1\bar{1}0)$ et (110) ?
- 8/ Quelle est la masse volumique théorique (en g/cm^3) du polonium ?

Données : Masse molaire Po = 209 g/mol

Nombre d'Avogadro : $N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Exercice 5

1. On considère un réseau cubique de paramètre de maille a .
 - 1.1. Préciser les indices de Miller des faces du cube.
 - 1.2. Tracer le plan (311) .
 - 1.3. Exprimer la distance entre 2 plans parallèles consécutifs de la famille de plan (311) en fonction du paramètre de maille a . On rappelle, dans le cas d'un cube :

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

2. On bombarde un cristal d'aluminium par un faisceau de rayons X de longueur d'onde

$\lambda = 154 \text{ pm}$. On observe un faisceau diffracté au premier ordre sous un angle θ de $39,2^\circ$ pour les plans réticulaires (311).

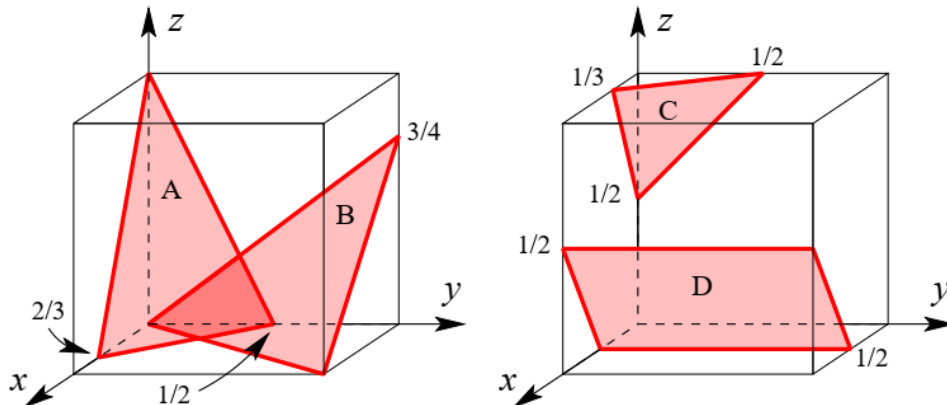
2.1/ Calculer le paramètre a de la maille de l'aluminium ?

2.2/ Retrouver cette valeur, sachant que l'aluminium cristallise dans le réseau cubique à faces centrées (CFC) et que le rayon de l'atome d'aluminium est de 143 pm .

$$1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$$

Exercice 6

1. Déterminer les indices de Miller des plans tracés dans les mailles élémentaires suivantes :



2. Tracer les plans suivants dans une maille élémentaire cubique : $(0^- 1^- 1^-)$, (11^-2) , (10^-2) et (1^-31) .

3. Dans une maille élémentaire cubique à faces centrées, combien d'atomes en propre coupent le plan (200) ?

4. Quelle est la coordinence d'un atome dans un cristal cubique simple ?

5. Faire un schéma puis donner les indices de Miller de la droite d'intersection des plans (111) et (110) dans un système cubique.

6. Connaissant le rayon de l'atome de tungstène r , sa masse molaire M , et sachant qu'il cristallise dans le système cubique centré, calculer sa masse volumique ρ . On donne le nombre d'Avogadro N_A .

A.N. : $r = 0,137 \text{ nm}$, $M = 183,85 \text{ g mol}^{-1}$ et $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ at mol}^{-1}$.

7. Donner la valeur exacte de la compacité k du réseau cubique à faces centrées.

8. Donner la valeur exacte de la densité atomique surfacique d du plan (001) du réseau cubique centré.

9. La structure cristalline du platine est cubique à faces centrées. Sa masse volumique est ρ et sa masse molaire M . Calculer l'arête a de la maille cubique. Calculer le diamètre atomique d du platine.

A.N. : $\rho = 21370 \text{ kg.m}^{-3}$ et $M = 195,1 \text{ g.mol}^{-1}$.

10. Lorsqu'on le chauffe, le fer subit une transformation allotropique à 912°C en passant du système cubique centré (cc) au système cubique à faces centrées (cfc). Connaissant les rayons respectifs des atomes de fer cc (r_{cc}) et cfc (r_{cfc}), calculer la variation relative de volume d'une pièce en fer lors de cette transformation.

A.N. : $r_{cc} = 0,124 \text{ nm}$; $r_{cfc} = 0,127 \text{ nm}$.

11. Dans un acier de structure cubique centrée, les atomes de carbone occupent les sites octaédriques (les milieux des faces). Calculer le rayon r_s de ces sites en fonction de r_{Fe} , rayon des atomes de fer.

Exercice N°7

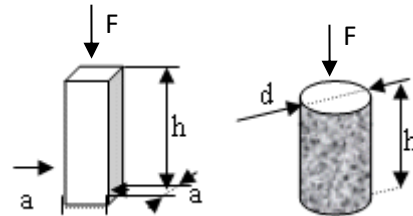
1/ Calculer la résistance en compression en (MPa) des éprouvettes ci-dessous si la charge uni-axiale de rupture F enregistrée est de 200 kN.

Eprouvette prismatique :

$a = 4\text{ cm}$; $h = 16\text{ cm}$

Eprouvette cylindrique :

$d = 16\text{ cm}$; $h = 32\text{ cm}$



2/ Un échantillon de forme cylindrique (Longueur $L = 4,2\text{ cm}$; $d = 2,8\text{ cm}$) est déposé sur les plateaux horizontaux d'une presse uni-axiale selon sa génératrice (figure ci-contre). On admet que seules deux lignes de cette génératrice sont en contact avec les plateaux de la presse.

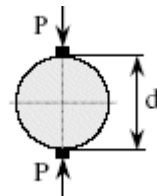
Un effort croissant est appliqué sur l'échantillon jusqu'à la rupture.

1/ Quel est le nom de cet essai ?

2.1/ Calculez la résistance de l'éprouvette en N/mm^2 , en MPa et en

bars ? Si la charge de rupture $P = 37,73\text{ kN}$;

2.2/ Quelle est la surface prise en considération pendant le calcul ?



Exercice N°8

Les données du tableau 1 ont été obtenues lors d'un essai de traction sur une éprouvette d'acier doux à 0.38% de Carbone, à fût cylindrique de diamètre $D_0 = 12\text{ mm}$ et de longueur utile $L = 20\text{ mm}$. Un extensomètre a été monté sur l'éprouvette. L'écartement initial l_0 des couteaux de l'extensomètre est égal à $l_0 = 10\text{ mm}$. On mesure l'évolution de l'écartement l des couteaux de l'extensomètre en fonction de l'effort appliqué sur l'éprouvette lors de l'essai.

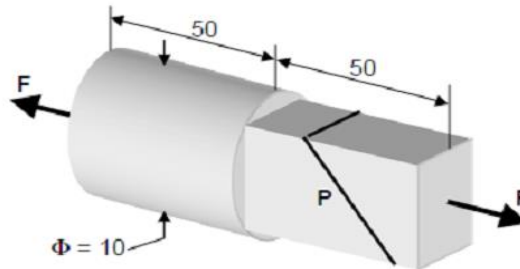
Tableau 1 : Résultats de l'essai de traction unidirectionnelle

$\Delta l(\text{mm})$	0	0,01	0,03	0,05	0,12	0,20	0,48	0,82	1,25	1,44	1,57	1,75
$F(\text{kN})$	0	30,3	62,5	59,5	68,4	84,3	91,2	91,7	90,7	90,3	87,1	78,1

1. Tracer la courbe $F=f(\Delta l)$, Déduire la force de la limite élastique F_e , et Δl_u ultime ?
2. Dresser un tableau de valeur et tracer la courbe conventionnelle $\sigma_t=f(\epsilon_t)$?
3. Estimez le module d'élasticité du matériau ?
4. Estimez la limite d'élasticité du matériau R_e , et déduire graphiquement sa limite d'élasticité conventionnelle $R_{e0.2}$?
5. Etudiez les différentes parties de la courbe. En particulier, que se passe-t-il au point 4 et entre les points 4 et 5.
6. Calculer le coefficient de striction $Z\%$ si la section D_u à la rupture est 9.66 mm ?
7. Déterminer la contrainte maximale en traction R_m du matériau en MPa ?
8. Que se passe-t-il lors de la striction ?
9. Le matériau est-il ductile ou fragile ?

Exercice N°9

La barre représentée ci-dessous est soumise à une force axiale de traction égale à 14500 N dans le domaine élastique. Son allongement élastique total est égal à 2 mm. Les données relatives au problème sont les suivantes :



- On néglige les concentrations possibles de contraintes ;
- Les cotes sont données en millimètres.

- 1/ Quelle est la contrainte (en MPa) développée dans chacune des sections ? Cylindrique et carrée ?
- 2/ Quelle est la déformation élastique ϵ_e (%) du matériau ?
- 3/ Calculez le module de Young E (GPa) du matériau ?

Exercice N°10

On réalise un essai de traction sur une éprouvette cylindrique faite d'un matériau cristallin ductile X. Les dimensions de l'éprouvette sont les suivantes :

- Diamètre : $d_0 = 20$ mm
- Longueur utile : $l_0 = 200$ mm

Au cours de l'essai, on observe que, sous une force F de 113,2 kN, l'éprouvette s'allonge de 0,742 mm. Après décharge complète à partir de cette force, la longueur de l'éprouvette est égale à 200,4 mm.

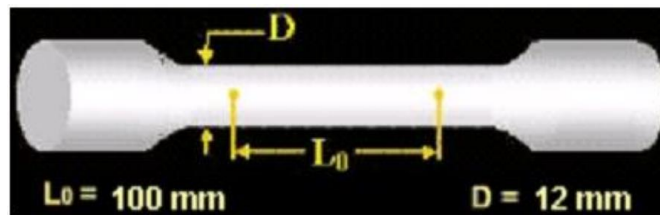
On constate également que sous une contrainte de 200 MPa, le diamètre de l'éprouvette diminue de 5,88 μm .

Avec ces données, on vous demande de calculer :

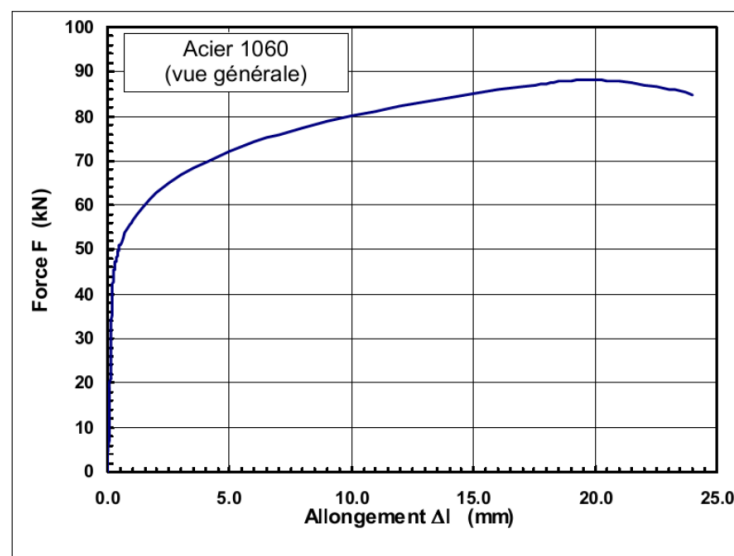
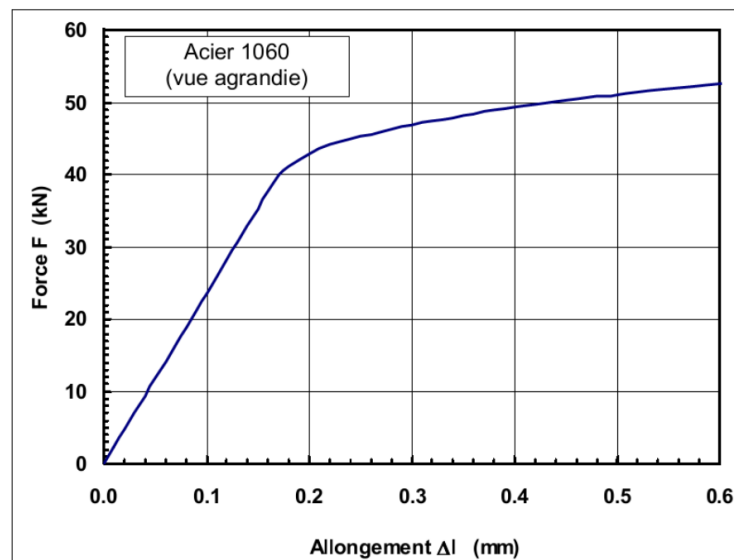
- a/ La limite conventionnelle d'élasticité $R_{e0,2}$ (en MPa) de ce matériau ?
- b/ Le module d'Young E (en GPa) de ce matériau ?
- c/ La résistance théorique à la traction R_{th} (en MPa) de ce matériau ? Sachant que $R_{th} = E/10$
- d/ Le coefficient de Poisson ν de ce matériau ?

Exercice N°11

On réalise un essai de traction sur une éprouvette d'acier 1060 à l'état recuit. Le plan de cette éprouvette est donné à la figure ci-dessous. Les vues agrandie et générale de la courbe brute de traction $F = f(\Delta l)$ sont données en dessous.



- Quelle est la valeur du module de Young E (en GPa) de l'acier 1060 ?
- Quelle est la limite proportionnelle d'élasticité R_e (en MPa) de l'acier 1060 ?
- Quelle est la limite conventionnelle d'élasticité $R_{e0,2}$ (en MPa) de l'acier 1060 ?
- Quelle est la résistance à la traction R_m (en MPa) de l'acier 1060 ?
- Quelle est la valeur de la déformation permanente A (en %) après rupture de l'éprouvette ?
- Calculez l'énergie élastique W_{el} (en J) emmagasinée dans l'éprouvette juste avant sa rupture finale ? L'énergie élastique W_{el} , emmagasinée se calcule par unité de volume de matériau à l'instant de la rupture.



Exercice N°12

1/ Classez les trois matériaux suivants dans l'ordre décroissant d'isolation selon les valeurs de leurs conductivités thermiques suivantes. Justifiez ?

	Porcelaine	Bois de sapin	Terre cuite
Conductivité thermique λ (W/m.K)	1,5	0,15	1

Afin de choisir un bon isolant thermique on donne, dans le tableau suivant, quatre isolants de types laines de roche et quatre autres de types laines de verre.

N°	Matériaux	Masse volumique (Kg/m ³)	Conductivité thermique (w/m.°C)	Capacité thermique (J/kg.°C)	Epaisseur (cm)	Classement
1	Laines de verre	7 à 12	0.044	612	8	
2		12 à 18	0.039	612	5.5	
3		18 à 25	0.037	612	9.8	
4		25 à 65	0.034	612	4	
5	Laines de roche	18 à 25	0.047	612	6	
6		25 à 35	0.041	612	4	
7		35 à 80	0.038	612	6.5	
8		35 à 80	0.038	612	10	

2/ Classer ces isolants (du mauvais au bon) ? Justifier votre classement ?

On considère une paroi dont l'épaisseur e_0 vaut $5,0 \times 10^{-2}$ m. Cette paroi est constituée de deux surfaces planes identiques dont la surface S_0 est égale à 1×10^1 m². La résistance thermique R_{th} de la paroi vaut $2,97 \times 10^{-1}$ K.W⁻¹.

3/ Que vaut la conductivité thermique λ de la paroi décrite ci-dessus ?

On chauffe sur une même plaque chauffante 10g de fer et 10g d'aluminium.

4/ En utilisant les chaleurs spécifiques massiques, lequel des deux matériaux (fer et Aluminium) va se chauffer le plus rapide. On donne : $c_{p(Fe)} = 0,451$ J/(g.°C) ; $c_{p(Al)} = 0,89$ J/(g.°C)

Exercice N°13

Un calorimètre contenant de l'eau froide ($m_1 = 100$ g) à une température $T_1 = 25^\circ\text{C}$. On introduit de l'eau chaude ($m_2 = 100$ g) ayant une température $T_2 = 50^\circ\text{C}$. La température d'équilibre est $T_{eq} = 35^\circ\text{C}$. Ecrivez les formules des trois chaleurs Q_{cal} , $Q_{e.f}$ et $Q_{e.c}$ du système et déduire la formule de la capacité calorifique du calorimètre C_{cal} ?

Donnée : $C_{p(eau(l))} = 4,185$ J/(g.°C)

Exercice N°14

Un calorimètre de capacité calorifique $C_{cal} = 120,5$ J/°C, contenant une masse d'eau $m_1 = 100$ g, l'ensemble est à la température initiale $T_1 = 20^\circ\text{C}$. On joute dans ce calorimètre un morceau de cuivre (Cu) de masse $m_2 = 200$ g à une température $T_2 = 60^\circ\text{C}$. On mesure la température d'équilibre thermique finale $T_{eq} = 25^\circ\text{C}$.

Donnée : $C_{p(\text{eau(l)})} = 4,185 \text{ J/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$

Calculer la valeur de la chaleur massique du cuivre $C_{p(\text{cu})}$?

Exercice N°15

On considère une barre cylindrique homogène, de section S et de longueur L . Elle est calorifugée latéralement et sa conductivité thermique est notée λ .

Ses extrémités sont maintenues à des températures constantes (T_1 en $x=0$ et T_2 en $x = L$). Elle est en outre parcourue par un courant électrique uniforme (selon Ox) et la résistivité appelée ρ .

La barre est suffisamment mince pour que la température ne dépende que de la variable x .

1. Déterminer la loi $T(x)$ dans la barre ?
2. Exprimer la puissance thermique reçue par la source T_2 , commenter les deux termes obtenus ?

Exercice N°16

L'aragonite est un carbonate de calcium cristallisé sous la forme orthorhombique, son coefficient cubique de dilatation thermique α_v est de $62 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, quand la température du cristal passe de 0°C à 100°C l'angle α entre les plans (100) et (110) décroît de $1'14$ alors que l'angle γ entre les plans (001) et (011) augmente de $2'24$.

Sachant que le rapport des paramètres cristallins à 0°C est tel que $\frac{a}{b} = 0,6224$ et $\frac{c}{b} = 0,7206$, en déduire la valeur des trois coefficients linéaires de dilatation thermique ($\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c$) de ce cristal.

Exercice N°17 :

Soit $V=f(p,T)$ l'équation d'état d'un solide dans laquelle V représente le volume d'une mole. Dans une transformation infinitésimale réversible, la quantité de chaleur δQ reçue peut être mise sous l'une des formes $\delta Q = C_v dT + l dV = C_p dT + h dp$.

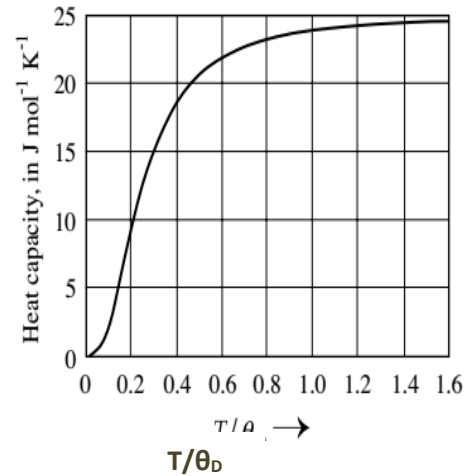
1/ Exprimer la différence $C_p - C_v$ en fonction de l et préciser la relation existante entre l et h .

2/ On désigne par U l'énergie interne, par H l'enthalpie et par S l'entropie d'une mole. Montrer que les principes de la thermodynamique permettent d'établir la relation suivante :

$$C_p - C_v = -T \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_T^2 / \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_T$$

3/ Expliciter le résultat précédent en fonction du coefficient de compressibilité β et du coefficient de dilatation linéaire α_l , préciser l'évolution en fonction de T du rapport $\frac{C_p}{C_v}$ si l'on admet avec Grüneisen que la quantité γ est indépendante de T . ($\gamma = \frac{3\alpha_l V}{C_v \beta}$).

A.N : à partir de la courbe représentée sur la figure ci-contre évaluer pour NaCl et Li, le rapport $\frac{C_p - C_v}{C_v}$ à la température ambiante.



On donne :

NaCl : $\beta = 4,26 \cdot 10^{11} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$; $\alpha_l = 4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$; $T_D = 280 \text{ K}$, $V = 268 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$; Li : $\beta = 8,62 \cdot 10^{11} \text{ m}^2 \cdot \text{N}^{-1}$; $\alpha_l = 45 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; $T_D = 460 \text{ K}$, $V = 128 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$.

Exercice N°18

Une barre en cuivre a une longueur égale à 20,0036 m à 20 °C.

a) Calculer sa longueur à 55 °C. $\alpha_{(\text{Cu})} = 1,66 \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$?

b) Quel est l'écart de température $\Delta\theta$ pour que la barre ait une longueur égale à 20,0500 m ? En déduire la température de la barre ?

Exercice N°19

Un récipient cylindrique supposé indilatable contient du mercure. La hauteur de mercure est égale à 16,00 cm à 20 °C. (la section du récipient est constante).

1/ Calculer la nouvelle hauteur à 100 °C ?

Un récipient ouvert en verre ordinaire est complètement rempli de mercure à 0 °C. La masse de mercure est égale à 680 g,

2/ Calculer le volume de mercure qui s'écoule hors du récipient quand la température de l'ensemble verre-liquide s'élève de 0 °C à 100 °C dans les deux cas : récipient indilatable et dilatable. ($\rho_{\text{mercure}} = 13,6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$).

Un thermomètre est constitué d'une capsule de verre pyrex soudée à un tube très fin. Le volume intérieur de la capsule est de 50 mm³. La section intérieure du tube est de 0,01 mm². La capsule est remplie de mercure qui, à 20 °C, arrive au bas du tube.

3/ De combien le mercure s'élève-t-il dans le tube lorsque la température monte jusqu'à 100 °C ?

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Belfar A, cours et exercices de cristallographie, polycopié de cours, USTO, 2014.
2. Besson J, Billon N, Cantournet S, Chastel Y, Monasse B, Nazé L, Lorenzon AFG, et Haudin J-M. Matériaux pour l'ingénieur, Ecoles des mines, 390 pages, 2006.
3. Degallaix S, Bernhard Ilchner B, caractérisation expérimentale des matériaux I, Propriétés physiques, thermiques et mécaniques, collection : traité des matériaux. 420 pages, 2007.
4. Dequatremare M, Devers T, Précis des matériaux, de la conception aux contrôles, DUNOD, Paris, 220 pages, 2012.
5. Dupeux M, Aide-mémoire sciences des matériaux, Edition DUNOD, 336 pages, 2004.
6. Michael F. Ashby and David R. H. Jones, matériaux, propriétés et applications, DUNOD, Paris, 2008.
7. Michael F. Ashby, David R. H. Jones, Matériaux. Propriétés, applications et conception - 4^e édition, 2020.
8. William D. Callister Jr, Science et génie des matériaux, cours et exercices corrigés, 5^{eme} Edition, 782 pages, 2003.
9. William D. Callister Jr, Fundamentals of Materials Science and Engineering an introduction, Wiley editor. tenth edition, 2001.