

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université M'Hamed Bougara, Boumerdès



Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

Polycopié de Cours Cristallographie

Licence LMD

Génie Mécanique

Réalisé par :
Dr. Mohamed-Saïd BOUAMERENE

- I. INTRODUCTION
- II. *Composition chimique des matériaux*
- III. **Liaisons chimiques**
 - 1 Liaisons fortes
 - 2 Liaisons faibles ou liaisons secondaires
- IV. **Classification des matériaux et des propriétés ;**
 1. Les grandes classes de matériaux
 2. Les propriétés d'usage
- V. **Etats physiques de la matière**
 1. Description de l'état cristallin
 2. La maille
 3. Réseaux de Bravais
 4. Compacité ou densité d'empilement
 5. Masse volumique du cristal
- VI. **Directions et plans cristallographiques**

Défauts dans les cristaux

1. Défauts ponctuels
2. Défauts linéaires ou dislocations
- 3- Défauts plans
3. Défauts volumiques (3 dimensions)

Applications

Calcul de la compacité

Calcul de masse volumique

Calcul du rayon atomique

Calcul de l'Energie de formation de lacunes

Indice de Miller

1) INTRODUCTION

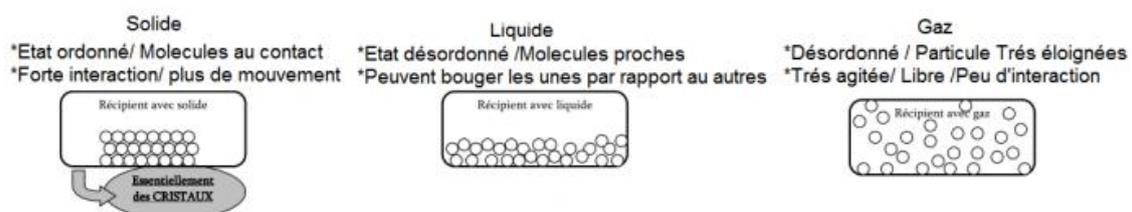
La maîtrise de nouveaux matériaux a été à l'origine de révolutions dans l'histoire des technologies. Les âges de la préhistoire sont d'ailleurs définis par les matériaux employés, âge de la pierre, âge du bronze, du fer.

Aujourd'hui, le nombre de matériaux ou en tout cas le nombre de références est considérable et en constante augmentation. En effet, la science des matériaux permet de concevoir de nouveaux matériaux adaptés à chaque nouvelle application.

Tous les matériaux qui nous entourent sont formés d'atomes et de molécules. L'arrangement et la relation qui existent entre ceux-ci expliquent certaines de leurs propriétés. Pendant longtemps les physiciens, en se fondant sur l'apparence immédiate des corps qui nous entourent, ont distingué les états solides, liquide et gazeux. La classification actuelle repose sur la structure atomique des matériaux et ne considère plus que deux états principaux : l'état désordonné et l'état ordonné (Figure 1).

Rem : Le solide est dur et ne se déforme pas. Au contraire, un liquide et un gaz se déforment, ils prennent la forme du récipient dans lequel on les place ; Le solide, placé régulièrement, forme des cristaux. Dans un cristal, il y a donc un ordre.

Dans l'état désordonné, les atomes ou molécules constituant la matière sont disposés de façon essentiellement aléatoire. Les gaz et les liquides de l'ancienne classification appartiennent naturellement à cette catégorie, mais aussi les solides amorphes, tels que les verres ou certains polymères, qui peuvent être en fait considérés comme des liquides de viscosité très élevée. A l'opposé, dans l'état ordonné ou cristallin, les éléments constitutifs (atomes, ions ou molécules) sont répartis de façon régulière suivant les trois directions de l'espace. Ces matériaux sont parfois qualifiés de « vrais solides ». La plupart des objets qui nous entourent relèvent de cette catégorie.



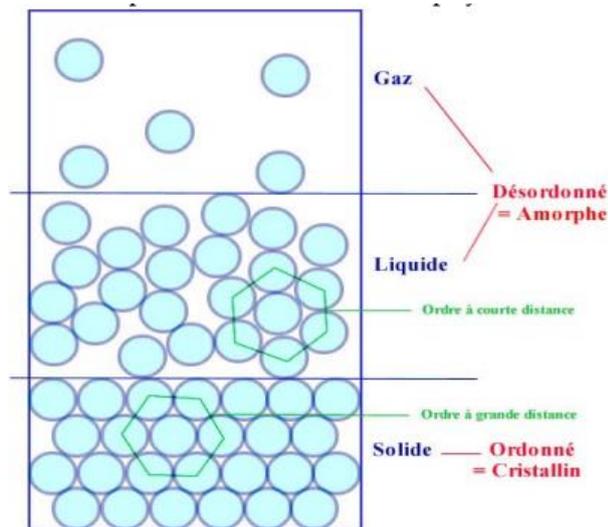


Figure 1 : Etat désordonné (amorphe) du gaz et des liquides. Etat ordonné (cristallin) des solides à l'exception des verres et de certains polymères

II. Composition chimique des matériaux

Les atomes des éléments chimiques diffèrent par leur structure à l'échelle subatomique, c'est-à-dire le nombre et la nature des particules élémentaires qui les constituent :

- noyau : protons et éventuellement neutrons ;
- cortège électronique gravitant autour du noyau : électrons en nombre égal aux protons dans un atome à l'équilibre.

Les protons sont chargés positivement et les électrons négativement, de charges élémentaires égales en valeurs absolues, de sorte que l'atome est électriquement neutre à l'état d'équilibre (figure 2.1). La masse de l'électron est négligeable devant celle du proton ou du neutron (tableau 2.1).

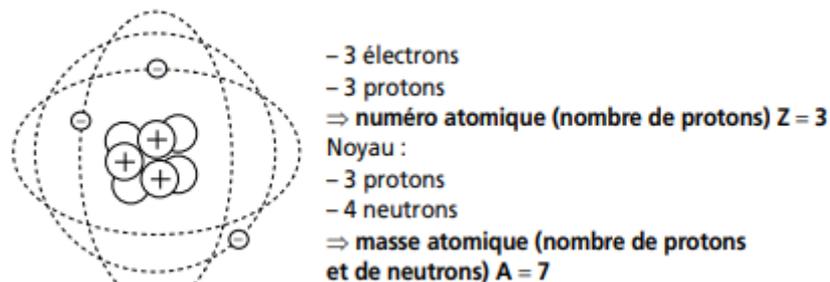


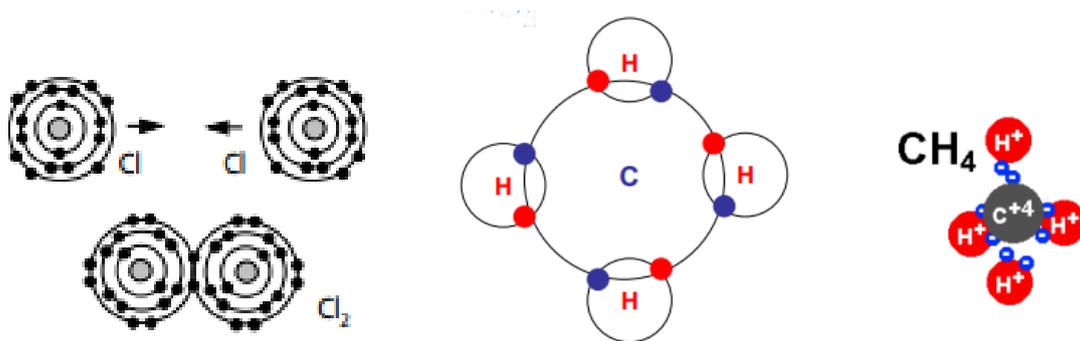
Figure 2.1 Exemple de l'atome de lithium

III. liaisons chimiques

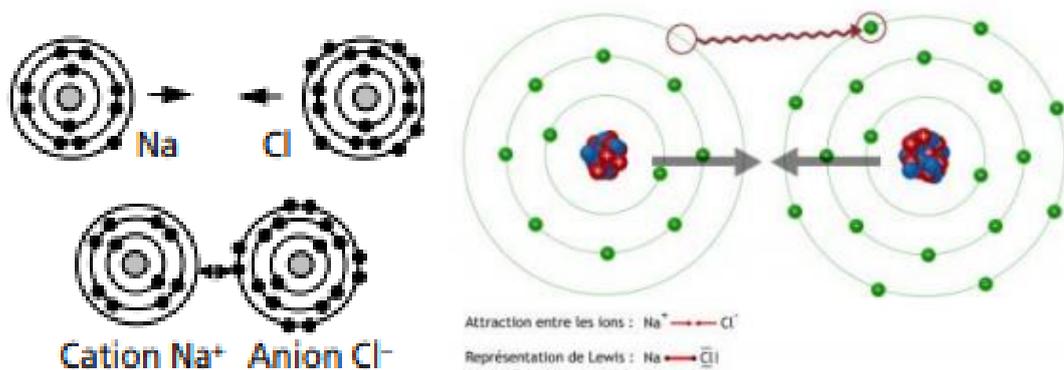
(1) Liaisons fortes

Liaison covalente. Elle est assurée par la mise en commun de deux électrons pour compléter la couche externe de chaque atome. Elle apparaît entre deux atomes de non-métaux (liaison assurée par des électrons de la bande de valence). Partage de 1 ou plusieurs paires d'électrons pour compléter leur couche électronique extérieure à 8 électrons. Orientée ou directionnelle.

Exemple. La molécule de dichlore Cl_2 et molécules d'éléments non métallique CH_4 , diamant



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. Exemple. Le chlorure de sodium NaCl .



Liaison métallique. Elle est assurée par la mise en commun d'électrons de la couche périphérique ; le « gaz » constitué par ces électrons libres et délocalisés assure la cohésion

de l'ensemble des cations restants. Elle apparaît entre les éléments d'un amas d'atomes métalliques (liaison assurée par les électrons de la bande de conduction). Les électrons de la liaison métallique sont mobiles et disponibles pour assurer la circulation éventuelle d'un courant électrique. Les électrons périphériques ne sont plus attachés à un atome. Ils sont délocalisés dans le solide sous forme de nuage qui assure la cohésion.

Exemple. Cristal de sodium Na.

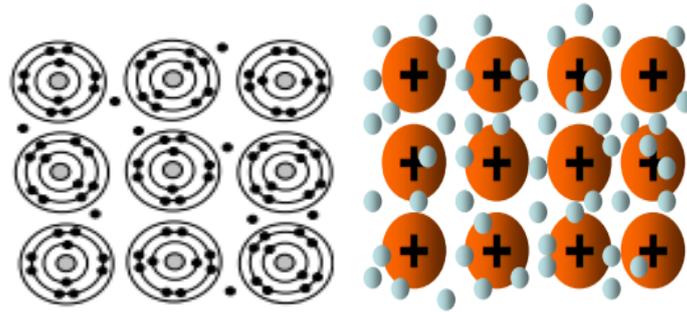


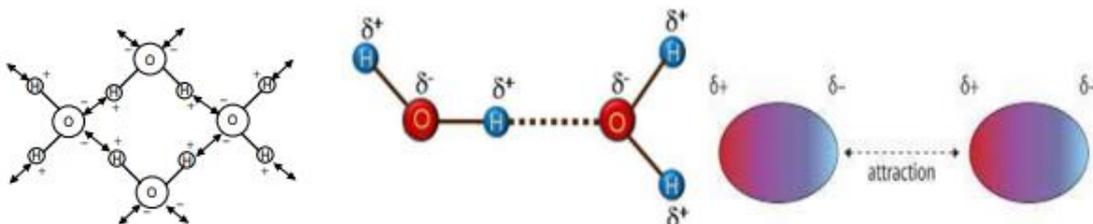
Illustration schématique de liaison métallique

(2) Liaisons faibles ou liaisons secondaires

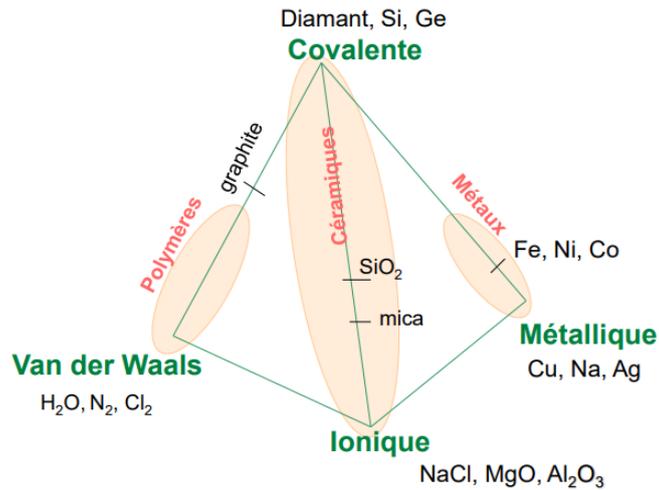
Ce sont de simples attractions électrostatiques entre charges électriques de signes opposés. Elles apparaissent entre les pôles + et - de molécules à répartitions de charges inhomogènes ou polarisables. Elles agissent à plus longue distance, mais avec une intensité plus faible que les liaisons fortes.

Exemples. • Liaisons de Van der Waals entre macromolécules dans un polymère.

• Liaisons-hydrogène entre molécules d'eau H₂O dans la glace (cf. schéma ci-dessous).



Pont hydrogène et Liaison de Van der Waals : Interaction électrostatique faible entre 2 molécules



IV. Classification des matériaux et des propriétés

1. Les grandes classes de matériaux

De nombreuses propriétés physico-chimiques et propriétés d'usage des matériaux sont étroitement liées à la nature des liaisons chimiques entre les atomes qui les constituent. C'est sur cette base qu'est établie la distinction entre les principales classes de matériaux.

Matériaux métalliques. Ce sont les métaux purs et leurs mélanges, ou alliages, comportant essentiellement des liaisons métalliques.

Matériaux organiques. Ce sont les matériaux d'origine biologique, les polymères et élastomères de synthèse, comportant des liaisons covalentes et des liaisons faibles.

Matériaux minéraux. Ce sont les roches, oxydes, verres minéraux, céramiques comportant des liaisons ioniques et/ou des liaisons covalentes.

Matériaux composites. Ils associent de manière structurée à fine échelle des matériaux différents, appartenant éventuellement à des classes différentes parmi les trois précédentes.

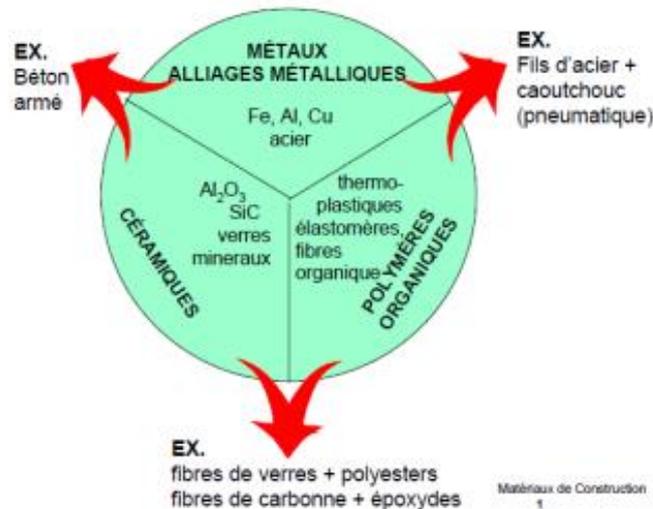


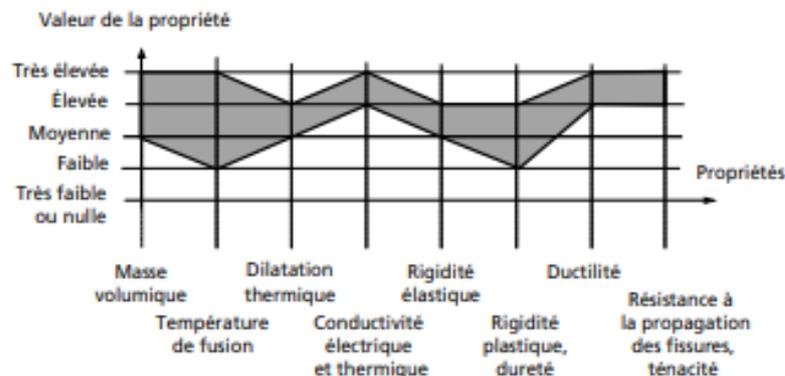
Figure 1.1 Classification des matériaux

2. Les propriétés d'usage

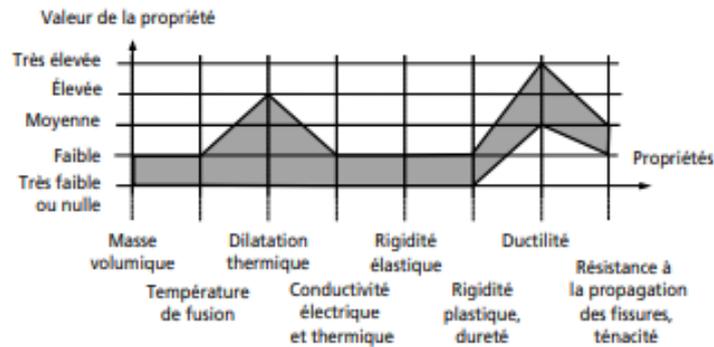
Les propriétés physico-chimiques et les propriétés d'usage des matériaux sont multiples et peuvent faire l'objet de diverses classifications (cf. tableau 2.4). Certaines sont principalement conditionnées par la nature des atomes et des liaisons chimiques présentes majoritairement dans le matériau : masse volumique, stabilité mécanique et thermique, température de fusion, souplesse ou rigidité élastique, fragilité ou ductilité, conductivité électrique et thermique, propriétés magnétiques... Certaines sont sensibles à la structure suivant laquelle les atomes sont disposés et organisés : rigidité plastique, dureté, ductilité, ténacité...

- **Les principales propriétés des grandes classes de matériaux**

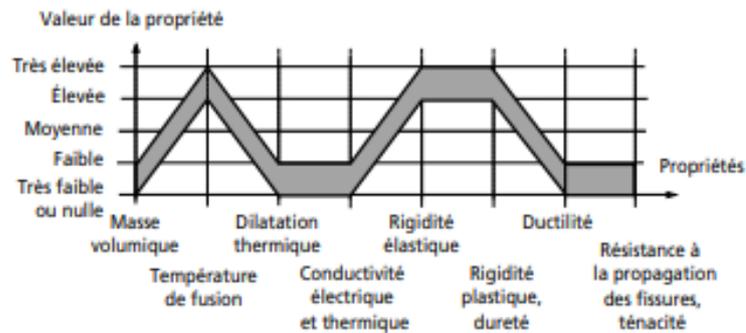
Matériaux métalliques



Matériaux organiques



Matériaux minéraux



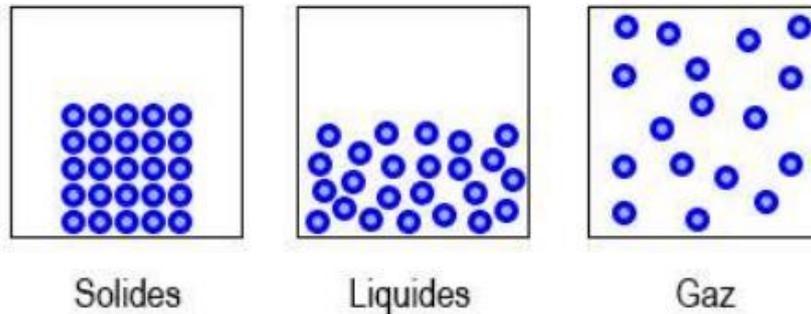
V. Etats physiques de la matière

Etats physiques de la matière La matière peut exister sous trois états physiques distincts : solide, liquide ou gaz. Ces différents états physiques proviennent essentiellement des effets de la température sur la microstructure.

- À température élevée, la matière est à l'état gazeux, état caractérisé par une distance importante entre atomes ou molécules disposés alors en désordre.

- À température plus basse, les forces d'attraction interatomiques ou intermoléculaires peuvent provoquer le passage à l'état liquide. Les atomes ou molécules sont en désordre, mais à courte distance.

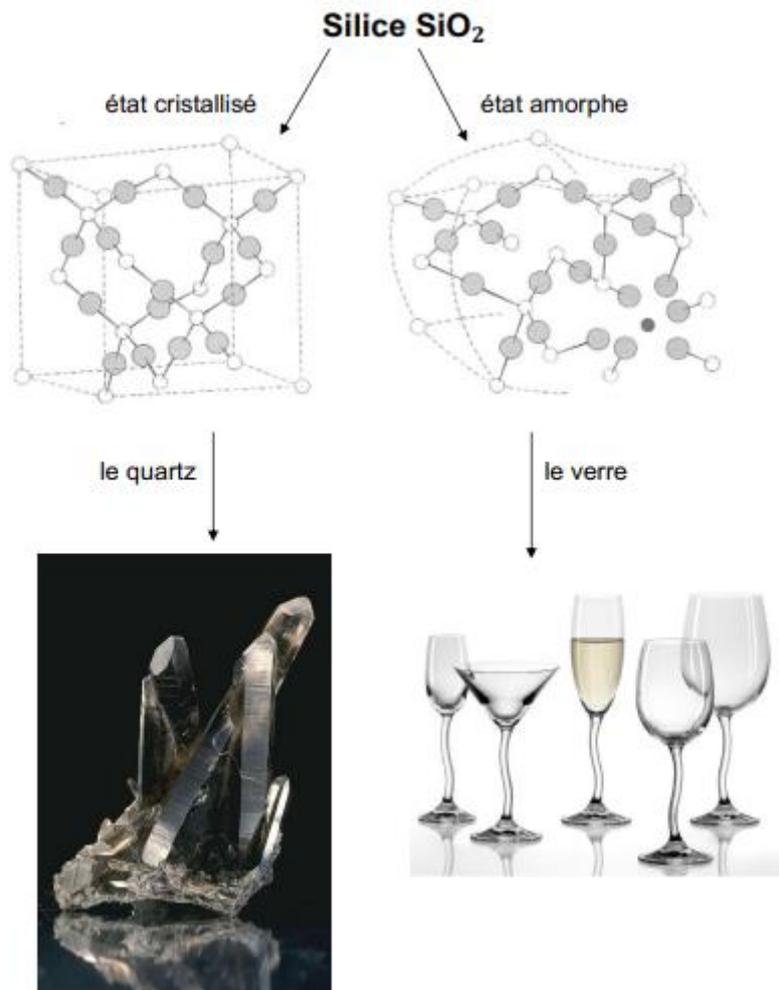
• À température encore plus basse, les forces d'attraction interatomiques devenant encore plus prépondérantes, la matière peut passer à l'état solide cristallisé. Les atomes sont alors ordonnés et à courte distance.



L'état solide est caractérisé par un volume et une forme fixée, les espèces constituant le solide occupent les unes par rapport aux autres des positions invariables. On distingue deux formes différentes de solides :

- Les solides cristallisés : ils se présentent dans la nature ou au laboratoire sous la forme de polyèdres, solides géométriques limités par des faces planes. Ce sont des cristaux de quartz (SiO_2), de blende (ZnS), de cuivre (Cu), de glace (H_2O) etc. Ces solides sont caractérisés par des températures de fusion T_{fus} correspondant au passage à l'état liquide.
- L'état amorphe est cependant très fréquent dans un certain nombre de céramiques (verres minéraux) et de matériaux organiques (verres organiques, caoutchoucs). Les corps amorphes sont caractérisés par la disposition chaotique de leurs atomes ce qui donne une structure interne désordonnée (comme un liquide). Un corps amorphe n'a pas de forme géométrique naturelle, ils sont assimilés à des liquides figés.

La différence essentielle entre ces deux types de solides provient du fait qu'un cristal est constitué par la répartition périodique dans deux ou trois dimensions d'un motif toujours identique formé d'atomes, d'ions ou de molécules, alors que dans un amorphe les motifs sont liés entre eux d'une manière irrégulière et suivant les lois du hasard.



1. Description de l'état cristallin

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.

- **Un réseau spatial** est constitué par un ensemble de points (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.

- **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.

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

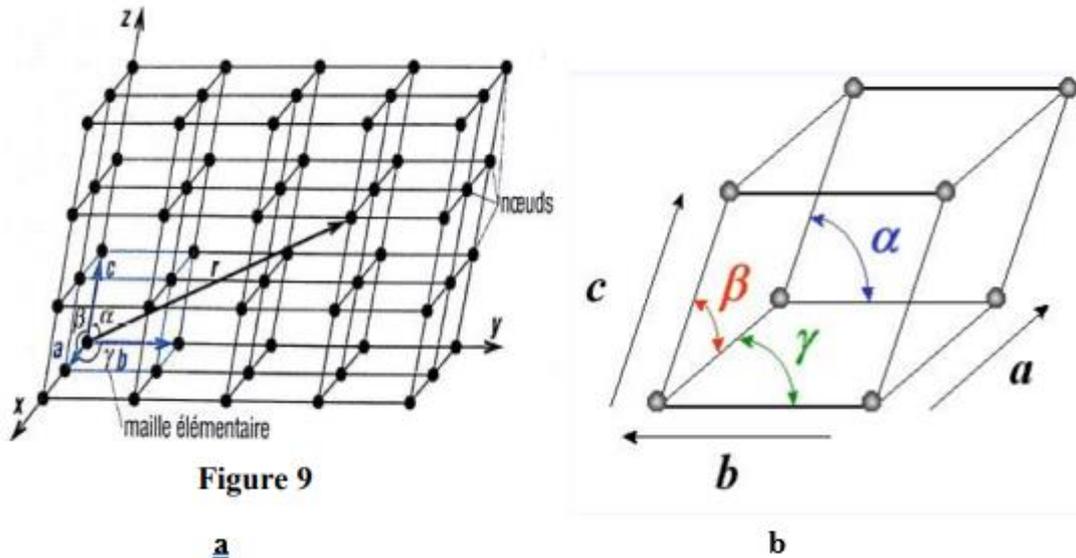


Figure 4. a : Réseau cristallin et b : Maille cristalline ($a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$)

Du point de vue géométrique, à deux dimensions, la maille est le plus petit parallélogramme qui suffit à décrire le plan (remplir tout le plan sans laisser de lacunes), cette maille est définie par les vecteurs a et b et l'angle compris entre ces deux vecteurs.

A trois dimensions, la maille est la plus petite entité (le plus petit volume) correspondant à un parallélépipède, elle est définie par trois vecteurs a , b et c (les périodes suivant les axes ox , oy et oz , respectivement) non coplanaires et trois angles α , β et γ (Figure 4). Avec cette maille on peut remplir tout l'espace du cristal sans laisser des lacunes.

Du point de vue physique, une maille est le plus petit groupement de constituants (atomes, ions ou molécules) suffisant pour décrire tout le cristal. Une maille cristalline quelconque (triclinique : $a \neq b \neq c$ et $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$) est définie par six paramètres cristallographiques, à savoir les paramètres linéaires (trois vecteurs a , b et c) et les paramètres angulaires (trois angles α , β et γ), tels que : $\alpha = \{\mathbf{b}^\rightarrow, \mathbf{c}^\rightarrow\}$, $\beta = \{\mathbf{a}^\rightarrow, \mathbf{c}^\rightarrow\}$ et $\gamma = \{\mathbf{a}^\rightarrow, \mathbf{b}^\rightarrow\}$ Le volume de cette maille est le module du produit mixte suivant : $V = (\mathbf{a}^\rightarrow, \mathbf{b}^\rightarrow, \mathbf{c}^\rightarrow) = \mathbf{a}^\rightarrow \cdot (\mathbf{b}^\rightarrow \wedge \mathbf{c}^\rightarrow) = \mathbf{b}^\rightarrow \cdot (\mathbf{c}^\rightarrow \wedge \mathbf{a}^\rightarrow) = \mathbf{c}^\rightarrow \cdot (\mathbf{a}^\rightarrow \wedge \mathbf{b}^\rightarrow)$

Qui donne là l'expression de V comme suit :

$$V = a \cdot b \cdot c [1 - \cos 2 \alpha - \cos 2 \beta - \cos 2 \gamma + 2 \cos \alpha \cos \beta \cos \gamma]^{1/2}.$$

La position occupée par un atome dans la maille s'appelle **un nœud**.

D'une façon plus simple, une structure cristalline est formée d'un réseau de nœuds plus un motif (Figure I.11).

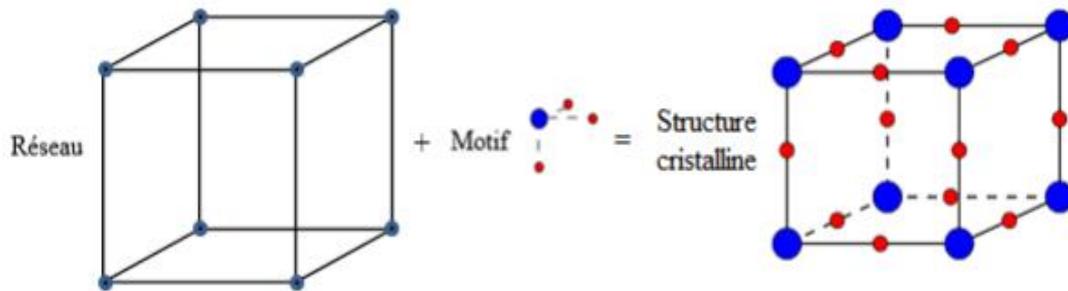


Figure I.11 : Structure cristalline tridimensionnelle.

3. Réseaux de Bravais

Symétrie et classification

La cristallographie consiste à classer les cristaux en fonction de leur symétrie. Auguste Bravais (1848) a montré que le nombre de systèmes cristallins possibles était très limité. Il a répertorié 14 types de réseaux qui sont des variantes de seulement 7 systèmes cristallins (Figure I.12).

◆ Système cubique :

- Réseau cubique simple (P) : atomes présents uniquement aux points du réseau.
- Réseau cubique centré (I) : il y a un atome supplémentaire au centre du cube.
- Réseau cubique faces centrées (F) : chaque face comporte un atome au centre de celle-ci.

◆ **Système hexagonal** : le système hexagonal peut se décomposer en prismes à base losangique (P).

◆ **Système orthorhombique** : simple (P), à 2 faces centrées (C), à faces centrées (F), à prismes centrés (I).

◆ **Système monoclinique** : simple (P), à faces centrées (F).

- ◆ **Système rhomboédrique** : 1 seul réseau (P).
- ◆ **Système tétragonal (quadratique)** : simple (P), centré (I).
- ◆ **Système triclinique** : 1 seul réseau (P).

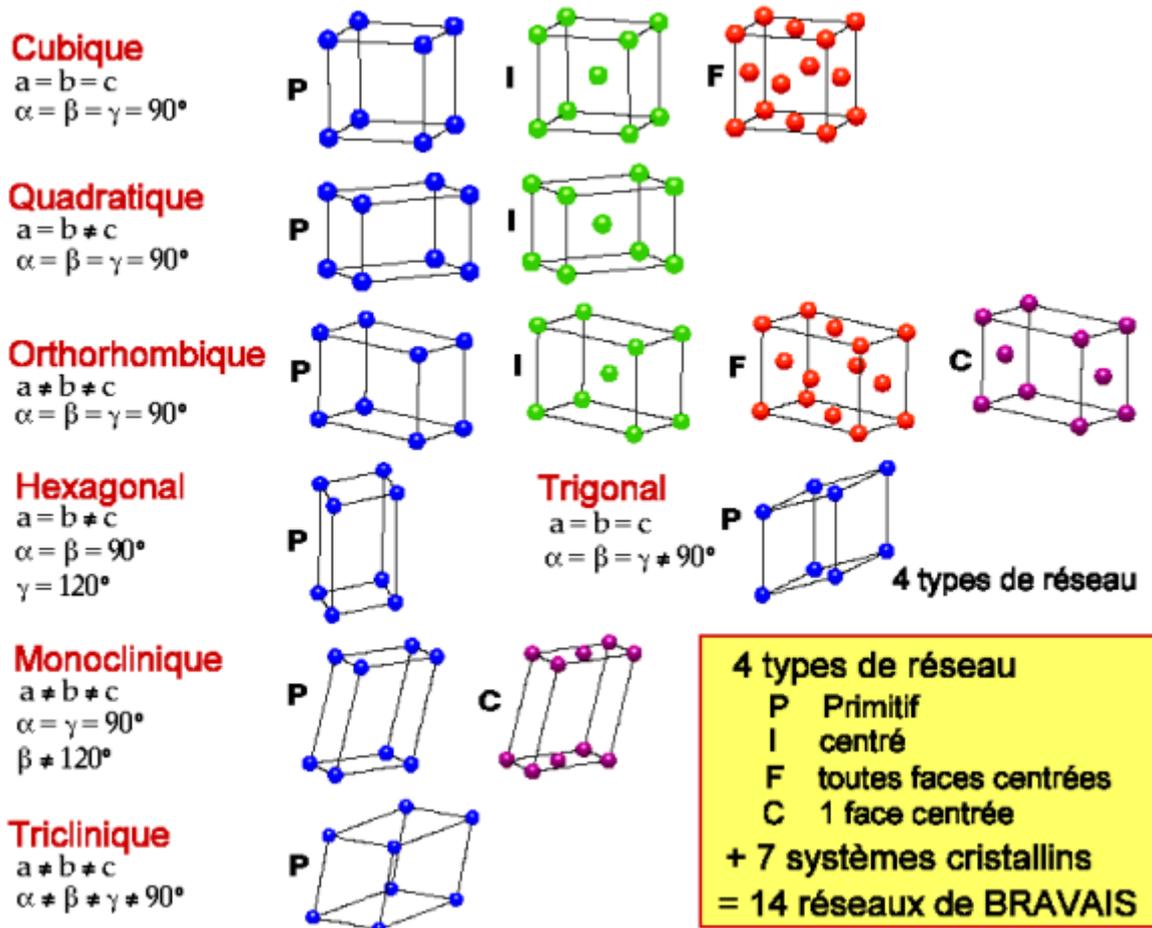


Figure I.12 : Les 7 systèmes cristallins de Bravais.

Pour les matériaux métalliques, trois structures sont généralement rencontrées, la structure cubique à faces centrées (ex. Cuivre, Aluminium, Nickel, Argent, Platine, Or), la structure cubique centrée (Fer α , Chrome, Tantale, Vanadium, Molybdène) et la structure hexagonale compacte (Titane, Zirconium, Cadmium, Zinc, Hafnium).

Parmi les systèmes énumérés dans le tableau précédent nous allons étudier le système cubique (CC, CFC) et le système hexagonal (HC). Un métal peut présenter plusieurs structures cristallines selon l'intervalle de température considéré, on dit qu'il présente un polymorphisme cristallin.

Exemple : Le Fer : 273°C CC 912°C CFC 1394°C CC 1538°C

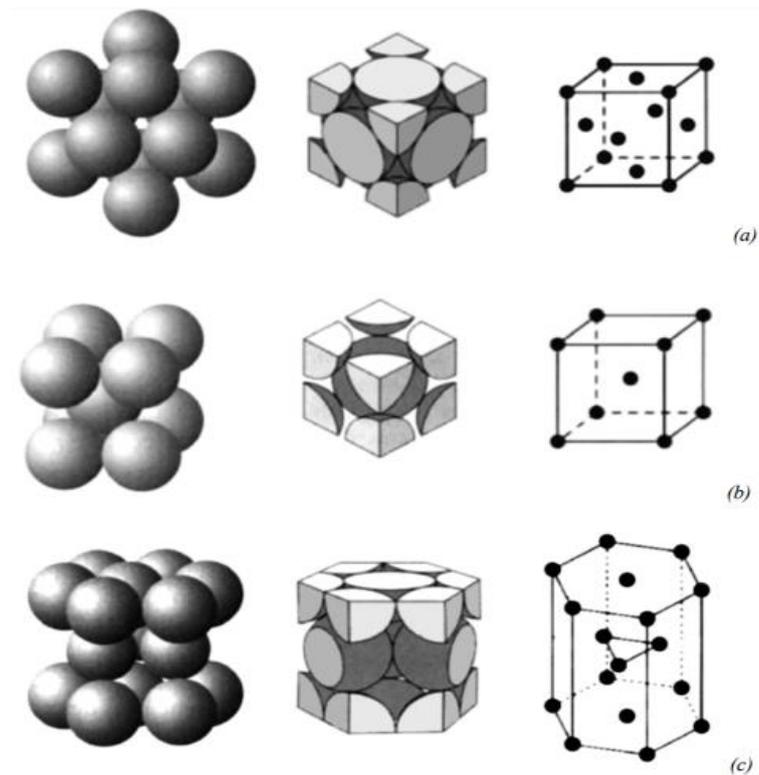


Figure 2 : Exemple de structures cristallines, (a) structure cubique à faces centrées (CFC), (b) structure cubique centrée (CC), (c) structure hexagonale compacte (HC).

Pour toute maille élémentaire :

- Les nœuds à l'intérieur des mailles comptent pour 1.
- Les nœuds aux sommets des mailles comptent pour 1/8.
- Les nœuds sur les arêtes des mailles comptent pour 1/4.

Les nœuds sur une face de maille comptent pour 1/2.

4. Compacité ou densité d'empilement

La compacité C d'un cristal est le volume relatif occupé par les atomes du motif dans la maille. Les constituants du cristal (atomes) se comportent comme des sphères dures rigides et indéformables. Dans ce cas, la compacité est donnée par la relation :

$$C = \frac{\text{volume occupé par les sphères}}{\text{volume total de la maille}} = \frac{N \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right)}{V_{\text{maille}}}$$

5. Masse volumique du cristal

Ramené à une maille, c'est le rapport de la masse d'une maille sur son volume.

$$\rho = \left(\frac{m}{V}\right) = N \frac{\frac{M}{Na}}{V_{maille}} = \frac{NM}{NaV_{maille}}$$

M représente la masse molaire

V_{maille} représente le volume de la maille

N_a représente le nombre d'Avogadro

N représente le nombre d'atomes par maille

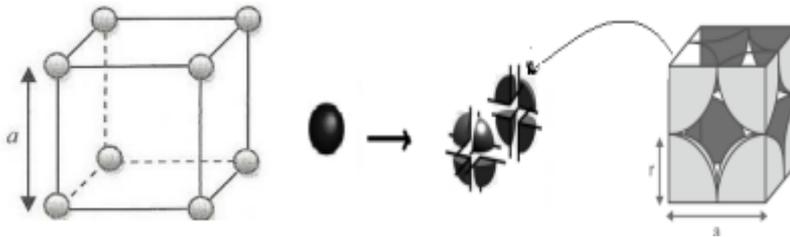
A) 1. Empilement cubique Simple

Dans une structure cubique simple représentée ci-dessous, les atomes sont tangents sur les arêtes. Il y a un seul atome par maille

- Nombre de motif appartenant en propre à la maille (multiplicité)

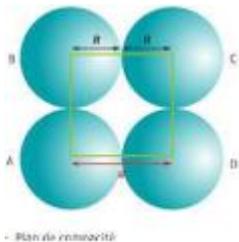
8 atomes aux sommets comptant chacun pour 1/8

La maille : $N = 1/8 \times 8 = 1$ atomes



Rayon métallique r : $2r = a$ (les atomes sont tangents selon l'arête du cube)

$$\frac{N\left(\frac{4}{3}\pi R^3\right)}{V_{maille}} = \frac{1\left(\frac{4}{3}\pi R^3\right)}{a^3} = 0,52$$



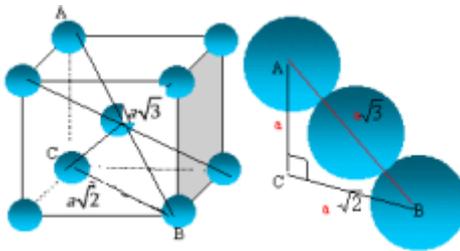
- **Compacité dans le système cubique centré**

Soit V le volume d'un atome : $V = \frac{4}{3}\pi R^3$

Nombre de motif appartenant en propre à la maille(multiplicité) :

- 1 atome placé au sommet du cube est commun à 8 cubes, il compte donc pour 1/ 8 ème pour chaque cube or il y a 8 sommets dans un cube. • 1 atome placé au milieu du cube :
- $N = 8 \times 1/8 + 1 = 2 = 2$ atomes/maille.**

- les atomes sont tangents selon la grande diagonale du cube



$$4r = a\sqrt{3} \Rightarrow r = a\sqrt{3}/4.$$

La compacité s'exprime comme le rapport :

$$C = \frac{NV_{sphere}}{V_{maille}} = \frac{4N}{3} \pi (R/a)^3 = 0,68$$

La maille cc est représentée ci-dessous. Les atomes sont tangents dans le plan indiqué sur la figure. Dans ce plan, les atomes sont tangents sur la grande diagonale du cube.

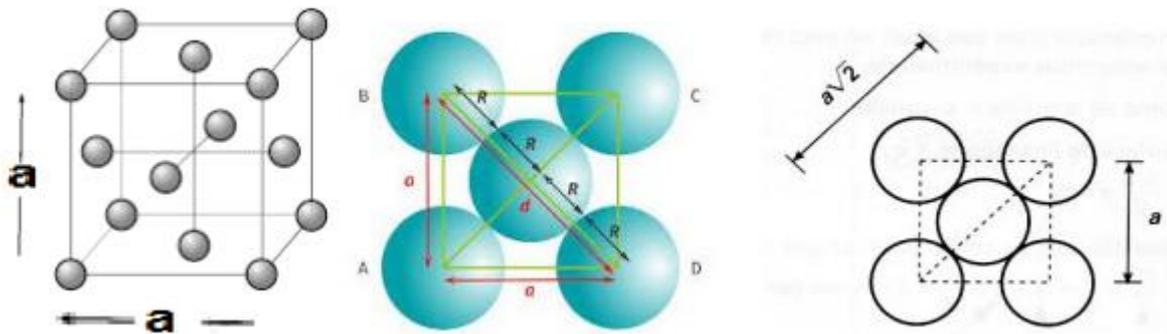
- **Compacité dans le système CFC (empilement cubique faces centrées)**

Dans une structure cubique à faces centrées représentée ci-dessous, les 8 atomes sur les sommets +des atomes au centre de chaque face (6faces). Les atomes sont tangents suivant la diagonale de faces. Il y a 4 atomes par maille.

Nombre d'atomes appartenant en propre à la maille CFC (N)

- 1 atome placé au sommet du cube et commun à 8 cubes, il compte donc pour 1/8 -ème pour chaque cube or il y a 8 sommets dans un cube.

- 1 atome placé au milieu d'une face d'un cube est commun à 2 cubes, il compte donc pour 1/2 pour chaque cube or il y a 6 faces dans un cube. Donc le nombre réel d'atomes présents à l'intérieur de chaque cube de cette structure est : $N = 8 \times 1/8 + 6 \times 1/2 = 4$.



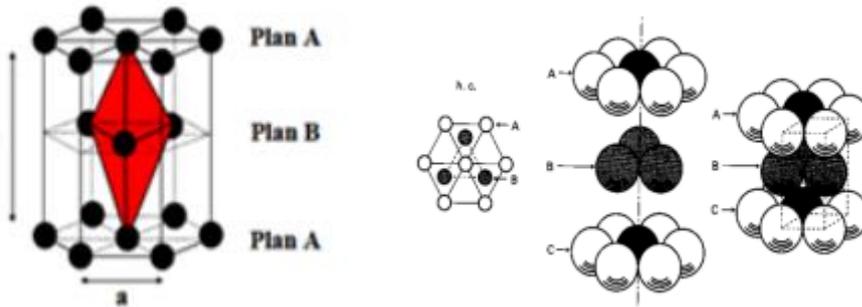
Sur le schéma d'une face de la maille élémentaire, on remarque que les atomes sont tangents suivant la diagonale d'une face et non suivant l'arrête.

La diagonale d'une face de longueur : $a\sqrt{2}$, elle contient quatre rayons atomiques donc : $4R = a\sqrt{2}$ ou $R = \frac{a\sqrt{2}}{4}$

$$\text{La Compacité } C = \frac{4 \left(\frac{4}{3} \pi R^3 \right)}{V_{\text{maille}}} \text{ et } V_{\text{maille}} = a^3$$

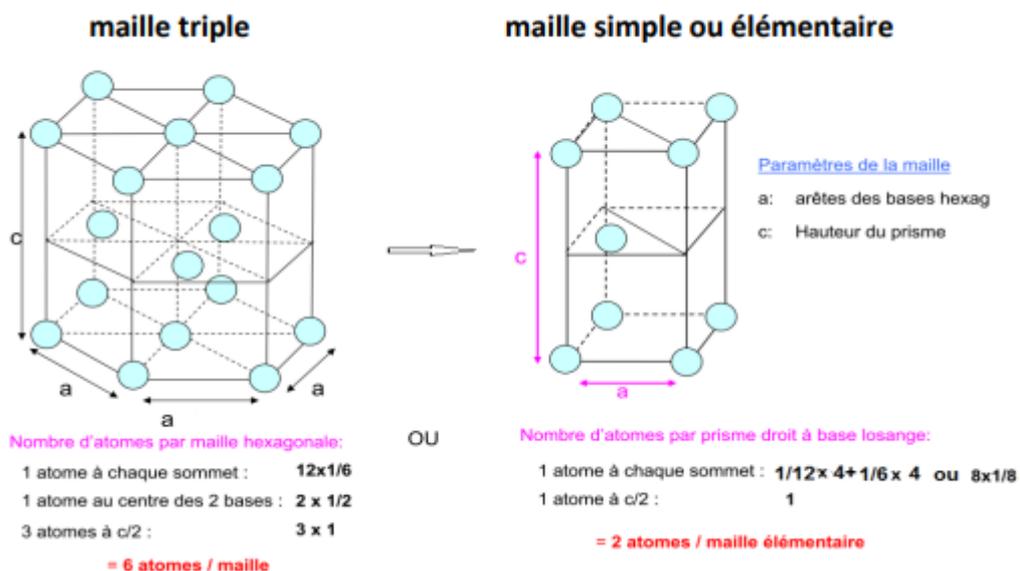
On en déduit que $C = \frac{\pi\sqrt{2}}{6} = 0,74$

- **Empilement HC (hexagonal compact) :** a) empilement AB : il n'y a que 2 couches A et B.



Maille prisme droit à base hexagonale ou prisme droit à base losange 1/3 de la maille. Le prisme droit à base hexagonale :

- 2 paramètres linéiques $a = b$ et $c = 2h$
- Angle $(a^{\wedge}b) = 120^{\circ}$ les autres sont égaux à 90°
- $N = 6$ (aux sommets : $12 \times 1/6 = 2$; la moitié inférieure de l'atome individualisé sur la figure est partagée entre 3 mailles, $2 \times 1/2 = 1$ (sur les centres de bases partagées avec les mailles au-dessus et dessous de celle qui est dessinée et au centre du prisme : 3 atomes on raisonne par rapport a la maille élémentaire = **1 3** de maille triple $N = 1 12 \times 4 + 1 6 \times 4 + 1 = 2$ Les atomes sont tangents selon l'arête de l'hexagone : $a = 2r$ ""**maille prisme à base losange = 1/3 de maille triple** ""
- Rayon métallique r : Les atomes sont tangents selon l'arête de l'hexagone : $a = 2r$



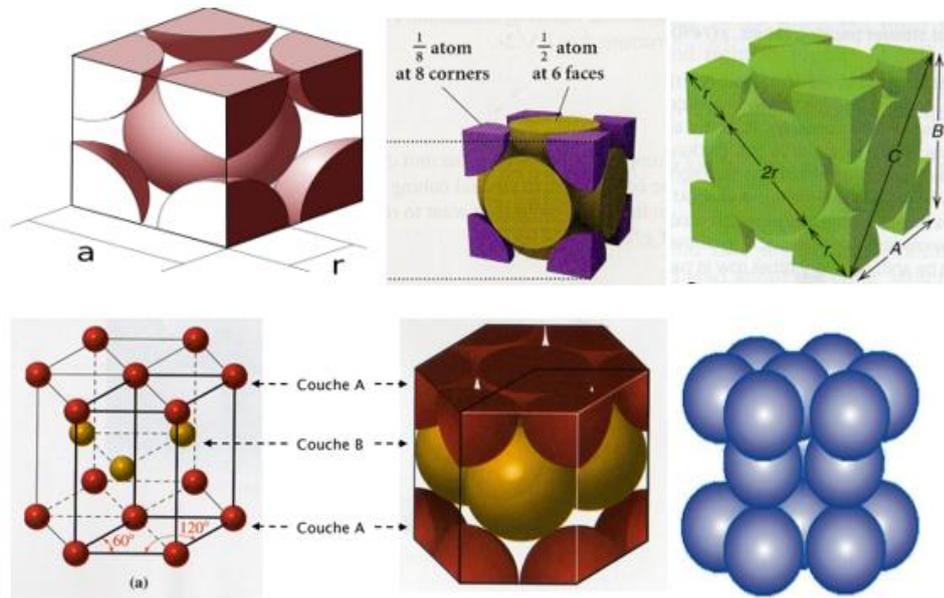
Compacité est pour la maille triple

$$C = \frac{6 \times \frac{4}{3} \pi R^3}{3\sqrt{2}a} = 0,74$$

Le même raisonnement sur le 1/3 de maille

Tableau 3.1 Structure cristalline et paramètres du réseau cristallin de quelques solides.

Solide	Structure	Paramètres de maille (nm)	
		a	c
Al	cfc	0,4049	
Au	cfc	0,4079	
C (diamant)	cd	0,3570	
Cr	cc	0,2884	
Cu	cfc	0,3615	
Fe α	cc	0,2866	
Fe γ (à 950 °C)	cfc	0,3656	
Ge	cd	0,5657	
Mo	cc	0,3147	
Ni	cfc	0,3524	
Si	cd	0,5431	
Sn α	cubique	0,646	
Sn β	quadratique	0,5824	0,3165
W	cc	0,3147	
Ti β (> 880 °C)	cc	0,3306	
Ti α	hc	0,2951	0,4679
Mg	hc	0,3209	0,5210
Zn	hc	0,2664	0,4945



VI. 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.

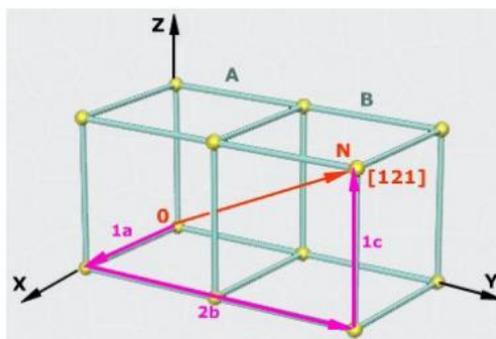
a) Direction cristallographique

On appelle direction cristallographique l'ensemble des rangées d'atomes parallèles et orientées dans une même direction autrement dit c'est une droite passant par deux nœuds du réseau, donc par une infinité de nœuds.

Si l'on suppose qu'elle passe par l'origine, on peut la désigner par les coordonnées u, v, w du nœud le plus proche de l'origine.

Les étapes à suivre pour déterminer les trois indices de direction sont les suivantes :

1. On trace un vecteur de longueur appropriée en le faisant passer par le point d'origine du système de coordonnées. Tout vecteur peut faire l'objet d'une translation sans modification au sein du réseau cristallin, à condition que le parallélisme soit conservé.
2. On détermine la longueur de projection vectorielle sur chacun des trois axes, et on exprime la mesure sur la base des dimensions a , b et c de la maille élémentaire.
3. On multiplie ou on divise ces trois nombres par un facteur commun, afin de les ramener aux plus petites valeurs entières possibles.
4. On inscrit ensuite les trois indices, sans les séparer par des virgules, entre des crochets de la façon suivante : $[uvw]$. Les entiers u , v et w correspondent aux projections réduites le long des axes x , y et z respectivement.



1. les coordonnées de premier nœud :	1	2	1
2. Réduction des Fraction :	1	2	1
3. Indices de Miller de direction :	1	2	1

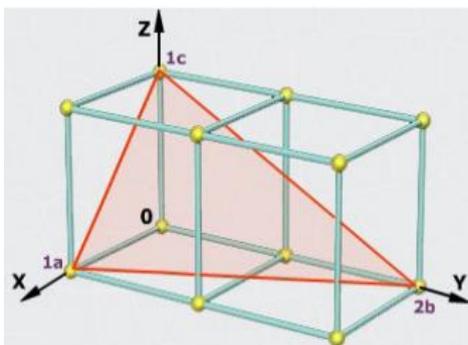
b) Plans cristallographiques

On appelle **plan cristallographique** l'ensemble des plans atomiques parallèles équidistants possédant une orientation donnée et une distance caractéristique donnée.

C'est un plan qui passe par trois nœuds non alignés du réseau, soit un plan qui coupe les axes (ox), (oy) et (oz) en M, N et P, de coordonnées respectivement (m,0,0), (0, n,0) et (0,0,p). Ce plan sera désigné par les indices de Miller h, k, l définis comme les plus petits entiers proportionnels à $1/m$, $1/n$ et $1/p$

- Détermination des indices de Miller : Pour déterminer les indices de Miller, il faut :
- Lorsque le plan passe par le point d'origine choisi, il faut soit procéder à une translation appropriée afin de produire un nouveau plan parallèle dans la maille élémentaire, soit établir un nouveau point d'origine sur le coin d'une autre maille élémentaire.
- A ce point, le plan cristallographique croise chacun des trois axes ou leur parallèle, on établit la longueur de l'intersection du plan avec chacun des axes sur la base des paramètres du réseau **a**, **b**, et **c**.
- On utilise l'inverse de ces nombres. Dans le cas d'un plan parallèle à un axe, son point d'intersection se situe à l'infini et, par conséquent, l'indice est zéro.
- Au besoin, on multiplie ou on divise ces trois nombres par un facteur commun pour les ramener à l'ensemble des plus petits entiers possibles.
- En dernier lieu, on place les indices exprimés par des nombres entiers entre parenthèses sans les séparer par des virgules, comme ceci (**hkl**).

Exemple :



1. Intersections avec les axes :	1	2	1
2. Inverses des intersections :	1/1	1/2	1/1
3. Réduction des Fraction :	2/2	1/2	2/2
4. Indices de Miller du plan :	2	1	2

NB : Lorsque le plan passe par le point d'origine choisi, il faut soit procéder à une translation appropriée afin de produire un nouveau plan parallèle dans la maille élémentaire, soit établir un nouveau point d'origine sur le coin d'une autre maille élémentaire ;

Dans le cas d'un plan parallèle à un axe, son point d'intersection se situe à l'infini et, par conséquent, l'indice est zéro ;

- **Densité atomique linéaires et planaires ou surfaciques**

L'équivalence directionnelle est liée à la **densité atomique linéaire** en ce sens que des directions équivalentes ont une même densité linéaire. Le vecteur de direction est placé de façon à passer par le centre des atomes, d'une part, et la portion de ligne comprise entre ces atomes est égale à la densité linéaire, d'autre part.

De la même manière, des plans cristallographiques équivalents ont la même **densité atomique planaire (surfacique)**. Le plan est placé de façon à passer par le centre des atomes. La densité planaire correspond à la fraction de l'aire totale du plan cristallographique qu'occupent les atomes (représentés par des cercles). Il importe de se rappeler que la densité linéaire et la densité planaire constituent de représentations respectivement unidimensionnelle et bidimensionnelle de la compacité.

Défauts dans les cristaux

Le cristal parfait déjà décrit ne se rencontre jamais dans la nature. Les cristaux réels contiennent toujours un certain nombre de défauts ou singularités en quantité variable. La présence et le nombre de défauts dépend du type de liaison chimique, de la pureté du cristal, de la méthode de préparation, ainsi que des traitements thermiques et/ou mécaniques subis. Dans cette partie de travail, nous passons en revue les différents types de défauts pouvant affecter l'ordre cristallin. Ces défauts jouent un rôle capital sur les propriétés optiques, électriques et mécaniques des cristaux.

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 plan ainsi que des défauts à trois dimensions.

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 le schéma suivant.

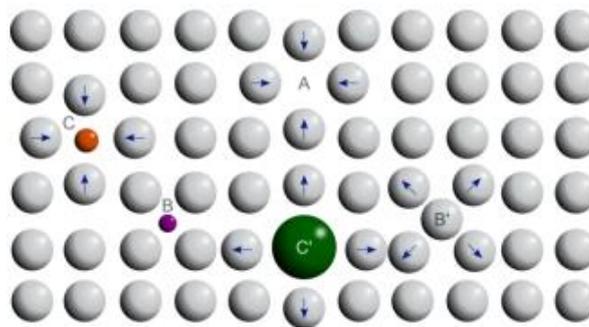


Fig.13 Schéma des défauts ponctuels d'un cristal : A- Lacune B- Atome étranger interstitiel
B'-Auto-interstitiel C et C'- Atomes étrangers en substitution

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 dû 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').

2. Défauts linéaires ou dislocations

Ces défauts appelés dislocations sont 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**.

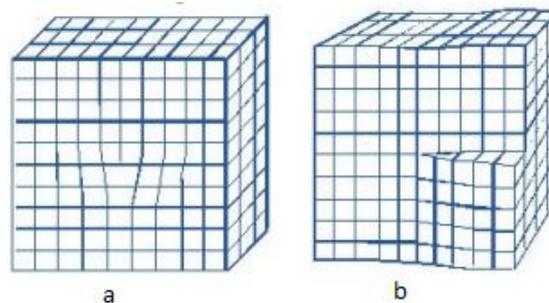


Figure 25 : Représentation schématique d'une dislocation coin (a) et d'une dislocation vis (b)

1. Dislocation coin

Une dislocation coin correspond à la présence d'un demi-plan atomique inséré dans le réseau cristallin qui se termine par une ligne de dislocation (ligne de dislocation perpendiculaire à la feuille, signalée par un T) (Figures 24,). Tout se passe comme si la rangée était une rangée supplémentaire qui s'enfonce dans le cristal, d'où l'origine du nom « coin ». La dislocation coin (\vec{b} est perpendiculaire à la ligne de dislocation, \vec{u} , vecteur unitaire de la ligne L).

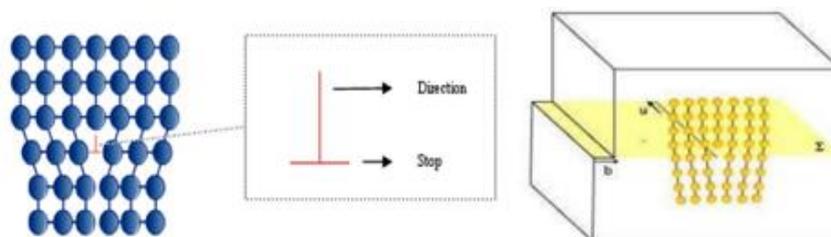


Figure 24 : Représentation schématique d'une dislocation coin

Le déplacement des dislocations produit la déformation plastique. La figure 16

montre comment les atomes se réordonnent au passage de la dislocation, et pourquoi la partie inférieure du cristal se déplace d'une distance b (appelée vecteur de Burgers) par rapport à la partie supérieure lorsqu'une dislocation traverse le cristal de part en part.

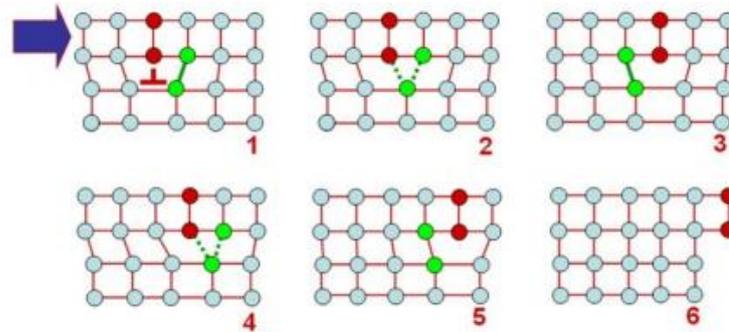


Fig.16 Déplacement d'une dislocation dans un cristal. Le schéma montre comment les liaisons atomiques du cœur de la dislocation se brisent et se referment pour permettre le mouvement de la dislocation.[10]

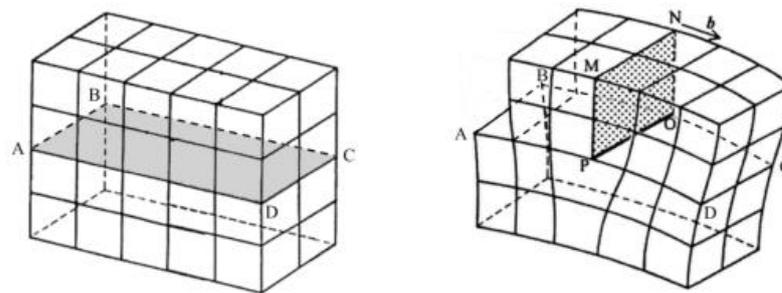


Figure 3 : Formation d'une dislocation coin (OP) dans le plan de glissement ABCD. La portion de cristal située au-dessus du plan de glissement et à gauche de la ligne de dislocation (OP) subit un glissement b par rapport au cristal situé en-dessous. Une dislocation est dite « coin » lorsque le vecteur de glissement b impliqué dans sa formation lui est perpendiculaire
Figure réalisée à partir de l'ouvrage « Dislocations et plasticité des cristaux », par [J.-L. Martin].

2. Dislocation vis

La dislocation vis tire son nom du fait que chaque point sur le « plan » atomique perpendiculaire à la ligne de dislocation monte d'un pas égal à \vec{b} à chaque tour d'une trajectoire qui enroule la dislocation. La topologie du champ de contrainte autour de la dislocation est donc celle d'une hélice, ou encore, si on fait le tour de la ligne en sautant d'atome en atome, on monte de \vec{b} lorsque l'on fait un tour (FIG.20).

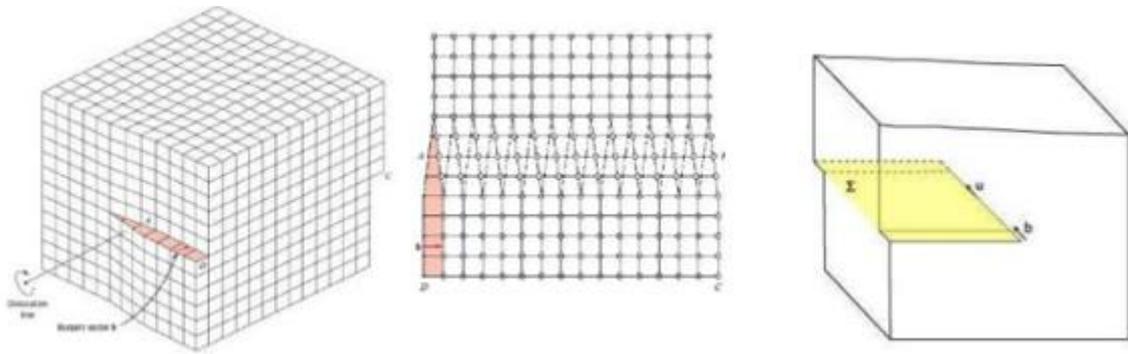


Fig. 20. Représentation des dislocations vis dans un cristal.

La Figure 4 montre la formation d'une dislocation de type vis par le glissement \vec{b} d'une partie d'un cristal cubique simple le long d'un plan (ABCD). La ligne de dislocation vis (PO) marque la limite entre la région du cristal qui a glissé et celle qui n'a pas glissé. Celle-ci s'étend à l'infini dans le plan de glissement, dans une direction parallèle à la direction de glissement \vec{b} .

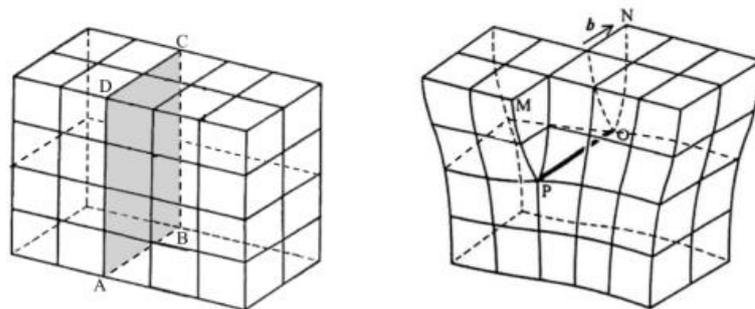


Figure 4 : Formation d'une dislocation vis (OP) dans le plan de glissement ABCD. La portion de cristal situé à droite du plan de glissement et au-dessus de la ligne de dislocation (OP) subit un glissement b par rapport au cristal situé en-dessous. Figure réalisée à partir de l'ouvrage « Dislocations et plasticité des cristaux », par [J.-L. Martin.]

3. Dislocations mixtes

Une dislocation n'est en général pas rectiligne. La Figure 5 présente une ligne de dislocation courbe (VC) séparant les parties d'un cristal restées immobiles et celles qui ont subi le glissement b sur le plan défini par les points V, M et C. La portion de l'arc (VC)

perpendiculaire à b , autour du point C, a un caractère de dislocation coin. La portion de la dislocation parallèle à b , autour du point V, est de type vis. La portion restante de l'arc (VC) constitue une portion de dislocation de type mixte.

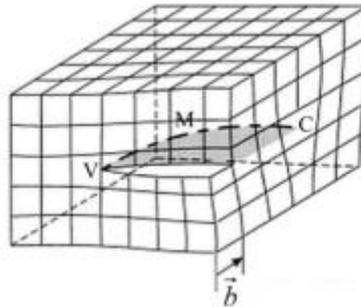


Figure 5 : Exemple de dislocation mixte. Figure extraite du livre « Introduction to dislocations », par [D. Hull et D.J. Bacon]

- **Vecteur de Burgers**

Le **vecteur de Burgers** d'une dislocation correspond au vecteur de glissement \vec{b} appliqué pour former celle-ci.

Il est possible de déterminer le vecteur de Burgers d'une dislocation en comparant les circuits de Burgers construits autour de la dislocation et dans la partie du cristal exempte de défauts. La méthode est la suivante (Figure 6) :

- Choix d'une orientation de la ligne de dislocation \vec{L} .
- Construction d'un circuit fermé autour de la dislocation, orienté suivant la règle du tire-bouchon. Le circuit est construit à partir des vecteurs \vec{t}'_i assimilables aux vecteurs du réseau cristallin \vec{t}_i , aux petites déformations près de ce réseau autour de la dislocation.

Le Circuit commençant au nœud D (pour « départ ») et finit au nœud F (pour « fin »). Les nœuds D et F sont confondus.

- Construction du même circuit dans le cristal parfait à partir des vecteurs de translation t_i , partant d'un nœud D et aboutissant à un nœud F. Les nœuds F et D sont cette fois-ci différents.

- Le vecteur de Burgers correspond au défaut de fermeture du circuit (DF) dans le cristal parfait : $b\vec{b} = \overrightarrow{FD}$.

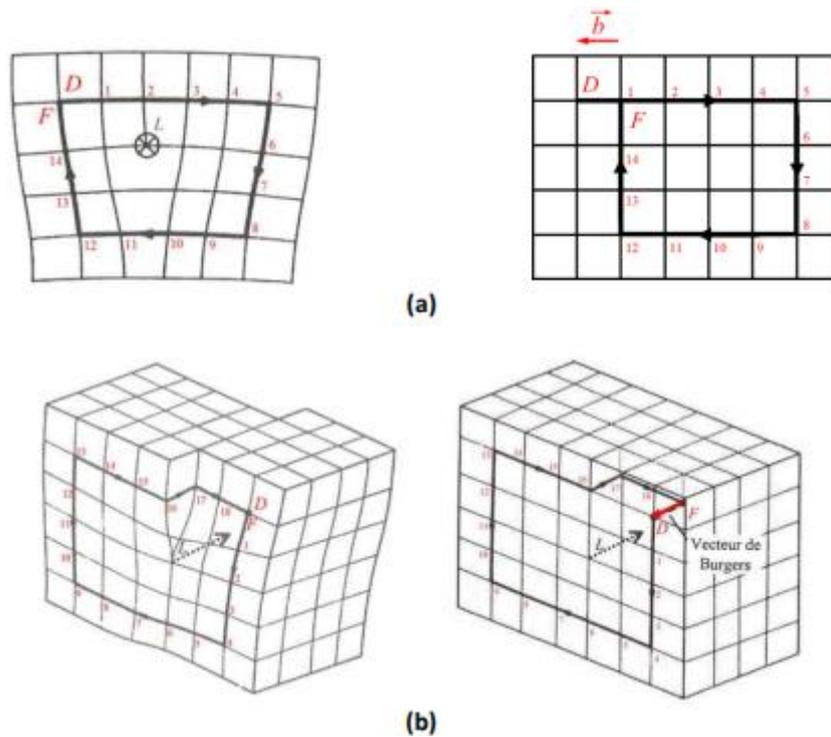


Figure 6 : Détermination du vecteur de Burgers d'une dislocation coin (a) et d'une dislocation vis (b). Figure réalisée à partir de l'ouvrage « Dislocations et plasticité des cristaux », par [J.-L. Martin.]

- **Défauts plans**

Les défauts à deux dimensions comprennent les joints de grains, (les joints de) macles, les sous-joints et les parois d'antiphase. Nous ne verrons que les joints de grains et les macles.

1. Les joints de grains

Un joint de grains est, par définition, la surface qui sépare deux cristaux d'orientations différentes dans un agrégat polycristallin (Figure 20).

En réalité, c'est plutôt une région assez désorganisée, de largeur non négligeable

(de l'ordre de 2 à 3 distances interatomiques). Elle joue le rôle de barrière au mouvement des dislocations et peut en émettre dans certaines conditions.

Les joints de grains sont des pièges à dislocation mais ce sont aussi des sources de dislocations. Par conséquent, les joints de grains interviennent dans les problèmes de déformation plastique et dans les mécanismes de durcissement.

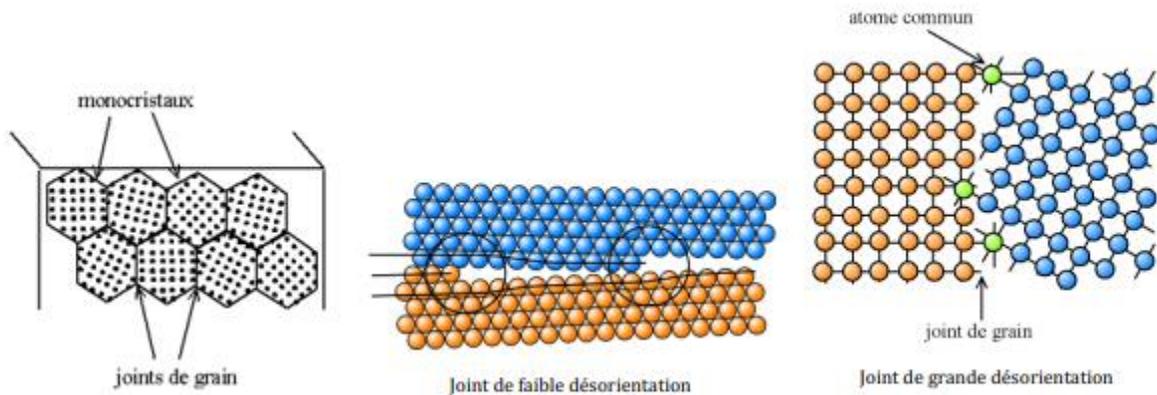


Fig.20 Description d'un joint de grain [12]

2. Les joints de macles

Les macles sont des défauts dans l'ordre d'empilement des couches denses d'atomes. Une macle est une partie d'un grain symétrique du reste du grain (ou cristal mère) par rapport à un plan cristallographique. Le joint de macle sépare deux parties du grain d'orientation symétriques (Figure 26).

Au cours de la solidification d'un métal liquide ou de la recristallisation d'un solide, l'ordre des plans peut s'inverser : par-dessus une couche A, par exemple, il y aura une couche C au lieu d'une couche B, ce qui produit une faute d'empilement. L'empilement global des couches devient alors CABACBAC ...

Le plan A est le plan de maclage, et la partie maclée du cristal (CBAC ...) est l'image miroir de la partie non maclée, le plan de maclage faisant office de plan miroir.

Les défauts d'empilement ont des incidences sur les propriétés mécaniques

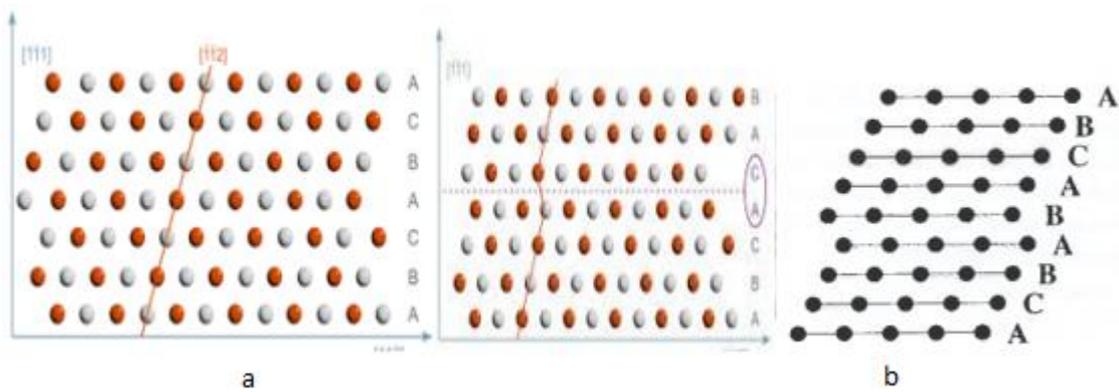


Figure 7 : (a) Représentation schématique d'un joint de macle : (a) Défaut d'empilement produit par l'absence d'un plan **B** et (b) Défaut d'empilement produit par l'absence d'un plan C dans la séquence ...ABC ABC A... constituant une structure cubique compacte. Figure (b) extraite du livre « Bases physiques de la plasticité des solides », par J.-C. Tolédano

4. Défauts volumiques (3 dimensions) :

On distingue trois types de défauts volumiques.

- 1. **Les pores :** Ce sont des cavités fermées à l'intérieur d'un cristal ou d'un poly-cristal.
- 2. **Les inclusions :** Ce sont des particules d'un solide de nature différente enrobées dans le solide principal ou matrice.
- 3. **Les précipités :** Ce sont des particules solides de petite taille entièrement enrobées à l'intérieur d'un grain qui constitue sa matrice.

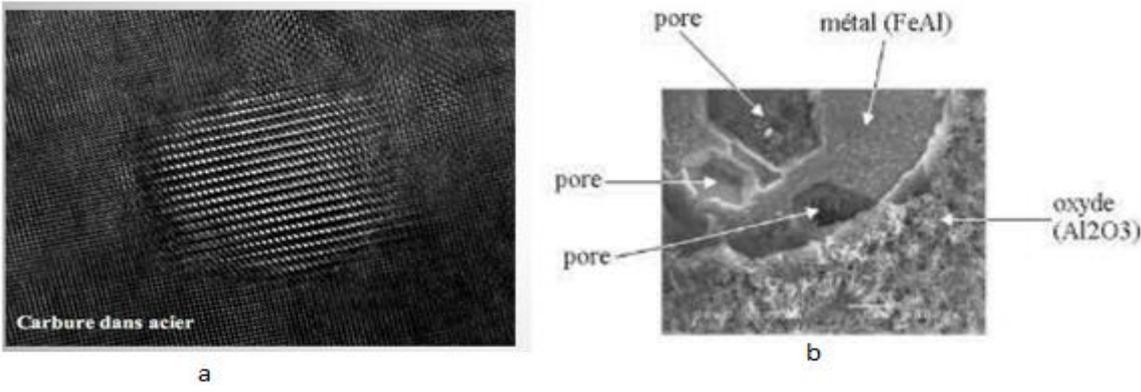


Figure 7 : Défauts volumiques (3 dimensions), (a) précipités, (b) pores et inclusions

Application

Calculez de la compacité des trois structures cubiques

A) Calculons d'abord le nombre d'atome par maille

- Une maille cubique Simple Cs

Cs : $n = 8 \times 1/8 = 1$ atome Chaque atome est partagé par 8 sommets .

- Une maille cubique centrée CC

CC : $n = 8 \times 1/8 + 1 = 2$ atomes

Chaque atome est partagé par 8 sommets et en ajoutant l'atome qui est au centre.

- Une maille cubique CFC CFC : $n = 8 \times 1/8 + 6 \times 1/2 = 4$

1 atome à chaque sommet partagé par 8 sommets & 1 atome au centre de chaque face

B) Calculons de la compacité des trois structures cubiques

On a la compacité $C = \frac{n \times 4\pi R^3}{a^3}$

1) Pour la maille simple: $a = 2R$,

$$\text{On aura donc } C = \frac{4\pi R^3}{3 \times 2 R^3} = \frac{\pi}{6} = 0,52$$

2) Pour la maille cubique centrée CC $a = \frac{4R}{\sqrt{3}}$ Donc la compacité C

$$C = \frac{2 \times 4\pi R^3}{3 \left(\frac{4R}{\sqrt{3}}\right)^3} = \frac{\pi\sqrt{3}}{8} = 0,68$$

3) Pour la maille cubique à face centrée CFC $a = \frac{4R}{\sqrt{2}}$

$$C = \frac{4 \times 4\pi R^3}{3 \times \left(\frac{4R}{\sqrt{2}}\right)^3} = \frac{\pi\sqrt{2}}{6} = 0,74$$

Le sodium métallique

Le sodium cristallise dans le système cubique centré. La masse volumique du solide est de $964 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$. En déduire le rayon atomique du sodium.

Donnée: $M(\text{Na}) = 23 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ •

Solution

Par définition, la masse volumique ρ est égale au rapport de la masse des atomes par le volume: $\rho = m/V$. Nous prenons comme volume V celui de la maille cubique usuelle, $V = a^3$, qui contient deux atomes,

$$m = 2 \cdot \frac{M(\text{Na})}{N_A}$$

Dans l'empilement cc., les atomes sont tangents suivant la diagonale principale du cube d'où:

$$4r(\text{Na}) = a \cdot \sqrt{3} \text{ soit:}$$

$$\rho = m/V = 2 \cdot \frac{M(\text{Na})}{a^3} = 2 \cdot \frac{M(\text{Na})}{\left(\frac{4r(\text{Na})}{\sqrt{3}}\right)^3} = 2 \cdot \frac{M(\text{Na}) \cdot 3\sqrt{3}}{64r^3(\text{Na})}$$

$$= 186 \cdot 10^{-12} \text{ m} \quad \text{donc le rayon est } r = 186 \text{ pm}$$

Le Fer

Le fer présente 3 variétés allotropiques. En dessous de 910°C, le fer cristallise dans le réseau cubique centré (fer α) ; entre 910 et 1410°C, le fer, sous forme γ , cristallise dans le réseau cubique à faces centrées. Entre 1410 et 1538°C (fusion du fer), c'est la variété δ cubique centré qui est stable.

On se propose d'étudier la variété γ . On précise $M_{\text{Fe}} = 55,85 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

1. Le rayon atomique R du fer, s'élève à 124 pm.

Calculer le paramètre de maille a du fer γ .

2. Calculer la masse volumique du fer γ .

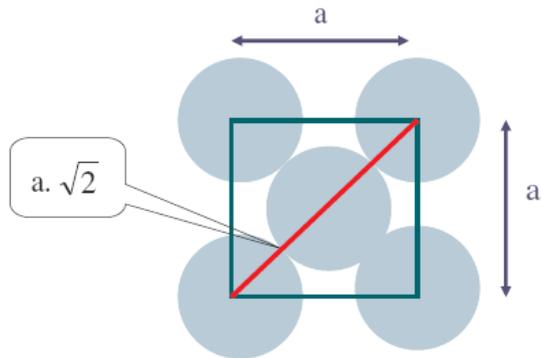
3. Calculer la compacité de ce cristal.

Solution.

Relation entre a et R dans le réseau cfc

Tangence des atomes suivant la diagonale de la face :

4. $R = a \cdot \frac{\sqrt{2}}{4}$ le paramètre de maille a AN : $a = 351 \text{ pm}$.
Picomètre 1 pm = $10^{-12} \text{ m} = 0,000\,000\,000\,001 \text{ m}$.



Résolution 2 : masse volumique du fer γ

$\rho = \text{masse de la maille} / \text{volume de la maille}$

$$\rho = N.M / (N_A \cdot a^3)$$

$$AN : N = 8 \cdot 1/8 + 6 \cdot 1/2 = 4$$

$$\rho = 8581 \text{ kg/m}^3 = 8581 \text{ kg/m}^3$$

Résolution 3 : compacité du fer γ

$C = \text{volume des atomes} / \text{volume de la maille}$

$$C = N \cdot 4 \cdot \frac{4}{3} R^3 / (3a^3) = 16 \cdot R^3 / (3a^3) = 0,74$$

Le thorium

Une des variétés allotropiques du thorium présente une structure cubique centrée de paramètre de maille $a = 411 \text{ pm}$, $M = 232 \text{ g/mol}$, $N_A = 6,023 \times 10^{23}$.

- 1) Quelle d'atome de cette maille ?
- 2) Déterminer la masse volumique de cette variété allotropique du thorium ainsi que sa densité.

Solution :

$$1) \text{ Le nombre d'atome de cette maille est: } Z = (8 \times 1/8) + 1 = 2$$

$$2) \text{ La masse volumique: } V = a^3$$

$$\text{La compacité } C = C = \frac{nxm}{N_A V} = \frac{2 \times 232 \cdot 10^{-3}}{6.023 \times 10^{23} \times (411 \cdot 10^{-12})^3} = 11,1 \cdot 10^3$$

$$\text{La densité est égale à } x = \frac{C}{C_{\text{eau}}} = 11,1$$

Le cuivre

Le cuivre cristallise dans la structure cubique centrée. Sa maille cubique a pour côté a_{cu} .

L'aluminium cristallise dans la même structure avec comme paramètre a_{Al} .

1. Donner en fonction de a_{cu} et a_{Al} , le rapport N_{Al} / N_{cu} des nombres d'atomes par unité de volume.
2. Donner en fonction de a_{cu} et a_{Al} , et des masses molaires respectives M_{cu} et M_{Al} le rapport des masses volumiques ρ_{Al} / ρ_{cu} .

Solution :

1. les deux métaux se cristallisent dans la même structure : cfc ; pour cette structure le nombre d'atomes par maille n est égale à 4. Le volume de la maille est égal à a_{cu}^3 , et a_{Al}^3 pour l'aluminium. Le nombre d'atomes par unité de volume est donc égal à :

$$N_{Al} = n / a_{Al}^3 \quad \text{et} \quad N_{cu} = n / a_{cu}^3$$

D'où $N_{Al} / N_{cu} = a_{cu}^3 / a_{Al}^3$

3. Prenons l'Aluminium, sa masse volumique est égale à :

$$\rho_{Al} = m_{Al} / v = (M_{Al} \times n) / N_A \times a_{Al}^3$$

M_{Al} / N_A étant la masse d'un atome, donc le rapport :

$$\rho_{Al} / \rho_{cu} = (M_{Al} / a_{Al}^3) \times (a_{cu}^3 / M_{cu})$$

Energie de formation d'une lacune

Calculer l'énergie de formation d'une lacune dans l'argent sachant que le nombre de lacune en équilibre à 800°C est égal $3,6 \times 10^{23}$ lacunes /m³, la masse molaire est $M = 107,9$ g/mol et la masse volumique est $\rho = 9,5$ g/cm³, la constante de Boltzmann est de $8,62 \times 10^{-5}$.eV/K

Solution

$$N = N = \frac{N_A \times \rho}{M} = \frac{6,023 \times 10^{23} \times 9,5 \times 10^6}{107} = 0,53 \times 10^{29} \text{ at/m}^3$$

$$nl = N \exp\left(-\frac{Q_e}{KT}\right) \longrightarrow Q_e = KT(\ln nl - \ln N)$$

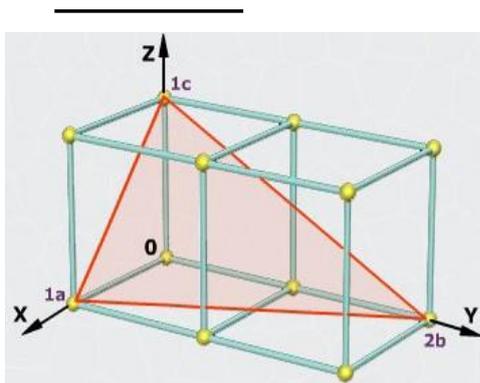
$$Q_e = 8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/K} \times 1073 (\ln 3,6 \times 10^{23} \text{ lacunes /m}^3 - \ln 0,53 \times 10^{29} \text{ at/m}^3) = 1,1 \text{ eV}$$

Indices de Miller

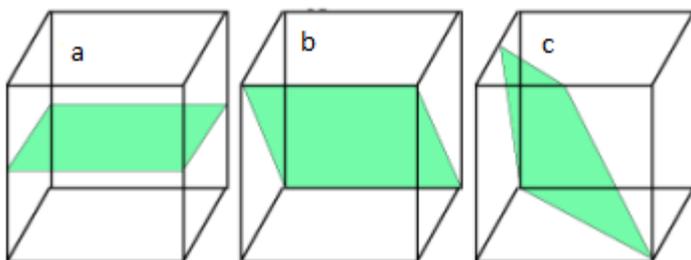
Pour déterminer les indices de Miller, il faut :

- Déterminer les points d'intersection (L'origine des 3 axes ne pas être dans le plan) ;
- Prendre les inverses ;
- Réduire les trois fractions au plus petit commun dénominateur ;
- Prendre les numérateurs (notés entre parenthèse).

Intersections avec les axes	1	2	1
2. Inverses des intersections :	1/1	1/2	1/1
3. Réduction des Fractions:	2/2	1/2	2/2
4. Indices de Miller du plan :	2	1	2



A) Déterminer les indices de Miller des plans représentés sur les figures suivantes:



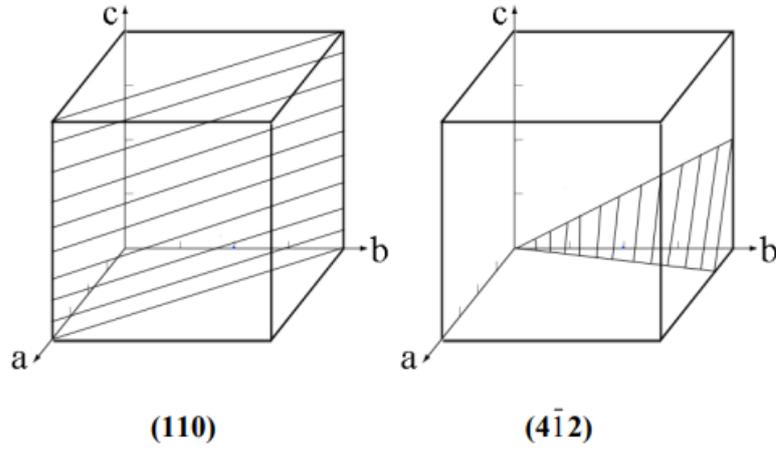
Réponses:

A \longrightarrow (0 0 2)

B \longrightarrow ($\bar{1}$ 0 1)

C \longrightarrow $(\bar{2} 2 1)$

B) Représenter les plans d'indices de Miller suivants (remarque : les plans doivent être situés à l'intérieur des cubes) : $(1 1 0)$ et $(4 \bar{1} 2)$



Références bibliographiques

1. Cours de A. RASKIN « Rappels atomistiques, structure des métaux, des alliages et des céramiques » 2009/2010 Société Francophone de Biomatériaux Dentaires, Université Médicale Virtuelle Francophone.
2. Michel Dupeux, AIDE-MÉMOIRE SCIENCE DES MATÉRIAUX, Université Joseph Fourier de Grenoble, Dunod 2005, ISBN 2 10 005458 9
3. Sylvie Pommier, Science des Matériaux (LA 314), 2005-2006, ENS de Cachan,
4. Claire Laulhé, « Physique et Applications - Structure de la matière » université-paris-Saclay.
5. Cristallographie géométrique et radiocristallographie, J-J Rousseau & A. Guibaud, Dunod 2007.
6. – Problèmes de cristallographie, J Lazjerowicz-Brunneteau et P. Ducros, Dunod 1967.
7. Diffraction des rayonnements : introduction aux concepts et méthodes, J. Protas, Dunod 1999
8. Roland FORTUNIER « PROPRIÉTÉS PHYSIQUES, MÉCANIQUES, ET ÉLECTRONIQUES DES MATÉRIAUX SOLIDES » Cours Ecole Nationale Supérieur des Mines, version 3.0 du 30 Novembre 2005
9. LOWYS J., Physique quantique et structure de la matière, cours ENSM-SE, 2000.
10. BELAHOUEL Mohamed « METALLURGIE, COURS ET EXERCICES CORRIGES » Cours USTO, 2016/2017
11. Somorjai G.A., Marie-Paule Delplancke, M.P. (1995). Chimie des surfaces et catalyse Édition : Edi science International
12. 7. Jean P. Mercier, Gérard Zambelli, Wilfried Kurz, Introduction à la science des matériaux, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 2002
13. J.-L. Martin, « Dislocations et plasticité des cristaux », Presses Polytechniques Romandes, février 2000.
14. Introduction to Dislocations D. Hull and D. J. Bacon, Departement of Engineering, Materials Science and Engineering, University of Liverpool, UK, Fifth Edition

Elsevier, 18 févr. 2011 - 272 pages,

15. 12. <http://deuns.chez.com/sciences/cristallo/default41.html>

16. 10. B. JACQUOT, *Propriétés mécaniques des Biomatériaux utilisés en Odontologie, Société Francophone des Biomatériaux Dentaires (SFBD), 2010*

17. *Bases physiques de la plasticité des solides, Jean Claude Tolédano, Palaiseau : Ed.de l'Ecole Polytechnique, 2007, ISBN :978-7302-1378-3*