

Cours 1 :

Introduction to Materials Engineering

Chapitre 1

Propriétés et Applications des matériaux

Chapitre 2

Désignation et Caractérisation mécaniques des matériaux

Chapitre 3

Structure des matériaux

Chapitre 4

Diagramme de phase et diagramme fer-carbone

Chapitre 5

Traitement thermiques des aciers

STRUCTURE DES MATERIAUX

1. CRISTALLOGRAPHIE
GEOMETRIQUES
2. STRUCTURES CRISTALLINES
DES MÉTAUX
3. DÉFAUTS CRISTALLINS
4. STRUCTURE DES POLYMÈRES

INTRODUCTION

Il existe 4 familles de matériaux :

Les métaux et alliages

Les polymères

Les céramiques

Les composites

La *structure* métallurgique peut être appréhendée à trois niveaux de connaissance.

- ❑ Dans l'industrie, les matériaux sont couramment observés à la loupe voire à l'œil nu. Les particularités que l'on constate appartiennent à la **macrostructure**.
- ❑ En utilisant un microscope optique, cette observation devenant plus fine, nous permet d'accéder à la **microstructure** de métaux.
- ❑ Cependant, il existe un niveau structural encore plus fondamental, mais que le microscope ne peut pas atteindre compte tenu de son pouvoir de grossissement, qui se situe à **l'échelle de l'atome**.

INTRODUCTION

- ❑ **Les propriétés** physiques, chimiques, mécaniques des matériaux permettent de **distinguer les grandes familles**.
- ❑ Ces propriétés dépendent de la **structure** du matériau aux différentes échelles.

Il faut donc **maîtriser les structures pour maîtriser les propriétés**.

I. CRISTALLOGRAPHIE GEOMETRIQUES

I.1 Introduction

- ❑ **L'état cristallin** se rencontre dans la plupart des métaux et dans un nombre important de **céramiques** et de **polymères organiques**.
- ❑ **L'état amorphe** est par contre très fréquent dans un certain nombre de **céramiques (verres minéraux)** et de **matériaux organiques (verres organiques, caoutchoucs)**.

I.2 Structure cristalline

- ❑ 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 (Fig.6).
- ❑ Un *réseau spatial* est constitué par un ensemble de nœuds ;
- ❑ 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.

I. CRISTALLOGRAPHIE GEOMETRIQUES

I.2 Structure cristalline

- ❑ La maille contient le **motif d'atome** qui se répète.
- ❑ La maille élémentaire est définie par trois vecteurs a , b et c .
- ❑ Les mailles ont donc un volume de formes géométriques simples (cube, parallélépipède) dont la répétition dans l'espace engendre le réseau et le cristal.

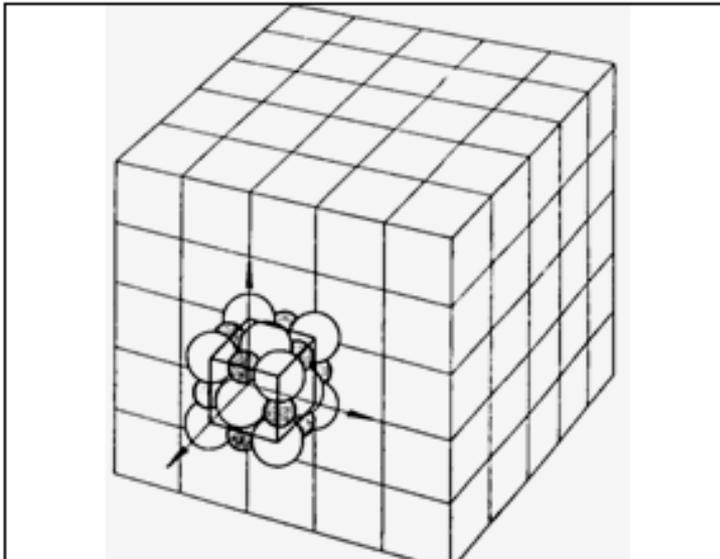


FIG. 6 Représentation de la maille cubique du cristal de NaCl et de son réseau

I. CRISTALLOGRAPHIE GEOMETRIQUES

I.3 Plans et directions cristallographiques

▪ Lorsqu'il est question de matériaux cristallins, il devient souvent nécessaire d'indiquer, à l'échelle des atomes, une direction ou un plan cristallographiques particuliers. C'est la maille élémentaire qui sert ainsi de base pour déterminer la valeur des indices, au moyen d'un système de coordonnées à trois axes (x, y, z) partant de l'un des coins de la maille élémentaire et coïncidant avec ses arrêtes.

Plan cristallographique :

On appelle plan cristallographique, 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

$$\text{à } \frac{1}{m}, \frac{1}{n}, \frac{1}{p} .$$

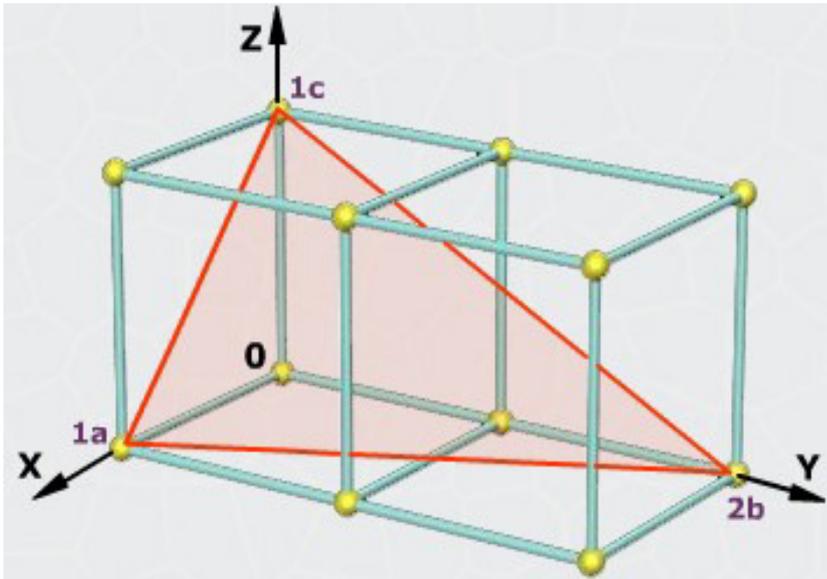
I. CRISTALLOGRAPHIE GEOMETRIQUES

❖ Détermination des indices de Miller :

Pour déterminer les indices de Miller, il faut :

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

❖ Exemple :

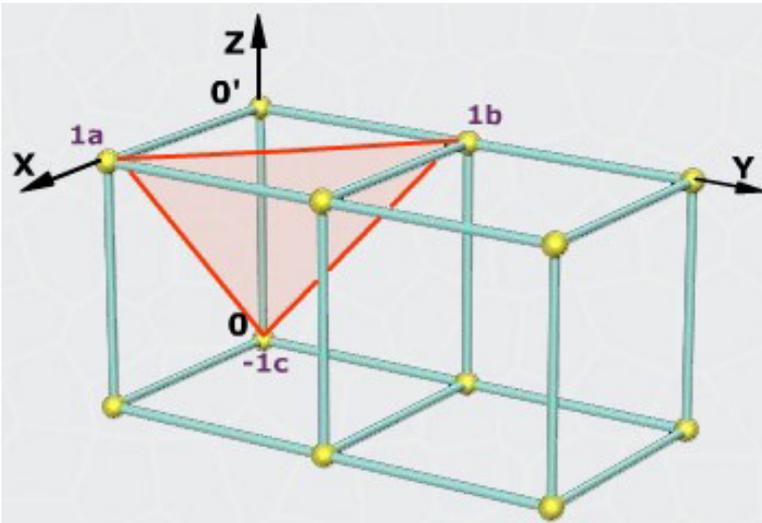


1. Intersections avec les axes :	1	2	1
2. Inverses des intersections :	1/1	1/2	1/1
3. Réduction des Fraction :	2/2	1/2	2/2
4. Indices de Miller du plan :	2	1	2

I. CRISTALLOGRAPHIE GEOMETRIQUES

Remarques :

✓ 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 ;



1. Intersections
avec les axes :

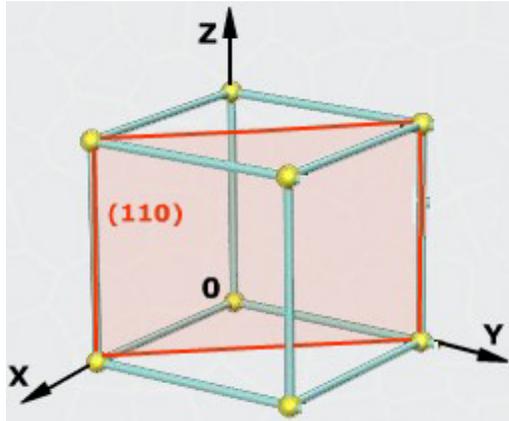
2. Inverses des
intersections :

3. Réduction des
Fraction :

4. Indices de Miller
du plan :

✓ 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** ;

I. CRISTALLOGRAPHIE GEOMETRIQUES



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

- En réalité, tout ensemble h,k,l désigne non seulement un plan mais aussi toute une famille de plans équivalents que l'on désigne par ;
- Tout indice négatif est désigné par un signe $-$ au-dessus du chiffre .

I. CRISTALLOGRAPHIE GEOMETRIQUES

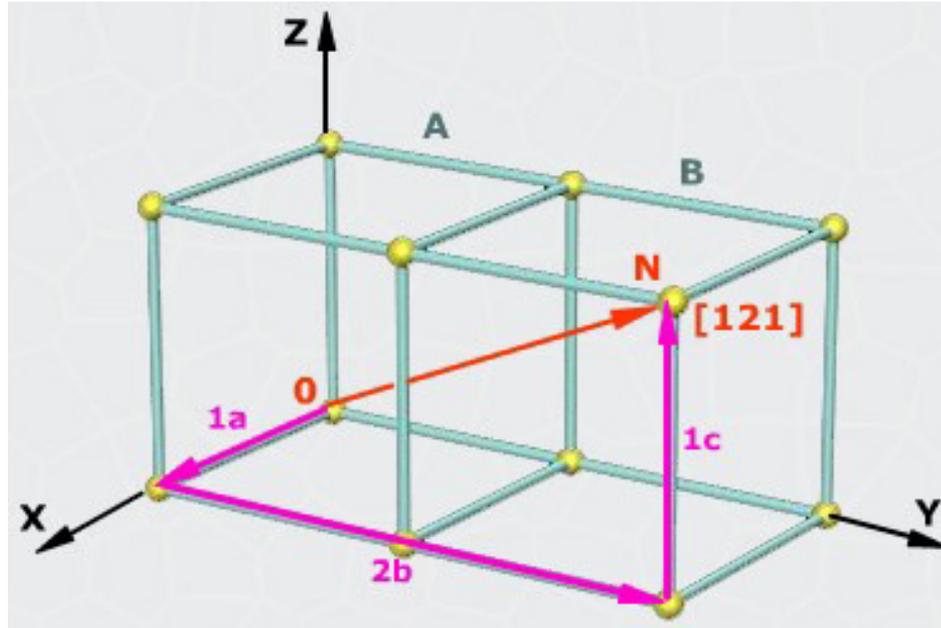
Direction cristallographique :

- On appelle direction cristallographique, 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.
- Voici les étapes à suivre pour déterminer les trois indices de direction :
 - On détermine la longueur de la projection vectorielle sur chacun des trois axes (les coordonnées de premier nœud, uvw) ;
 - On multiplie ou on divise ces trois nombres par un facteur commun, afin de les ramener aux plus petites valeurs entières possibles ;
 - On inscrit ensuite les trois indices [notés entre crochets droits].

I. CRISTALLOGRAPHIE GEOMETRIQUES

Direction cristallographique :

Exemple :

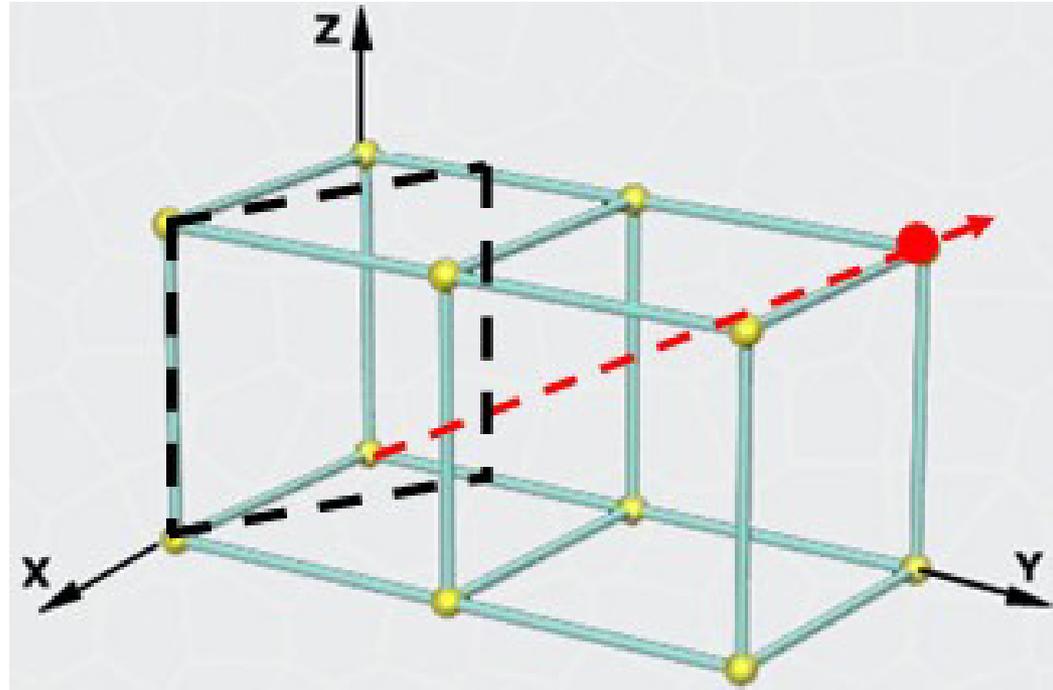
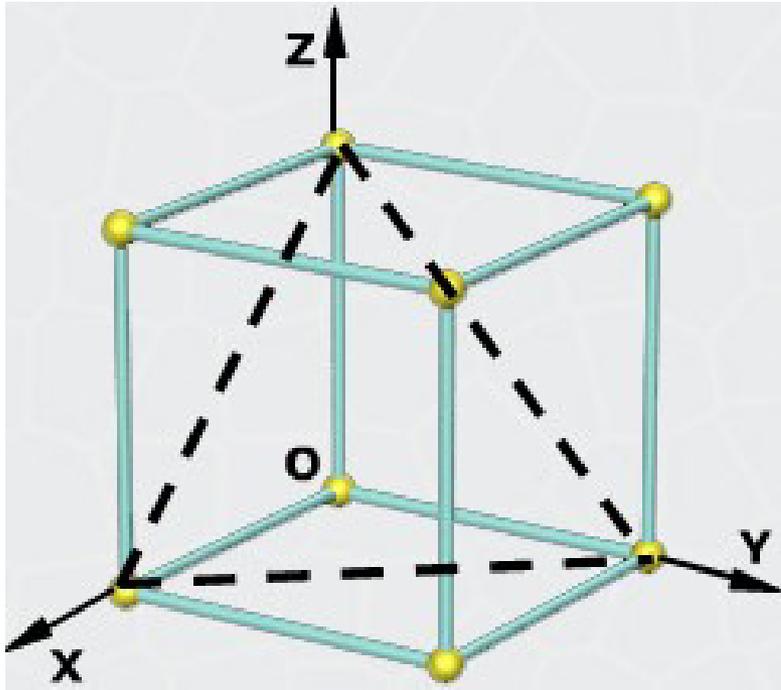


1. les coordonnées de premier nœud :	1	2	1
2. Réduction des Fraction :	1	2	1
3. Indices de Miller de direction :	1	2	1

I. CRISTALLOGRAPHIE GEOMETRIQUES

Application 2 :

1. Déterminez les indices de Miller pour les plans présentés dans les mailles élémentaires ci-dessous ;
2. Déterminez les indices associés à la direction montrée dans la maille élémentaire ;



II. STRUCTURES CRISTALLINES DES MÉTAUX

□ Les structures cristallines les plus fréquentes présentées par les métaux purs à l'état solide appartiennent aux systèmes **cubique et hexagonal**. Trois structures principales y sont représentées:

- la structure cubique centrée (CC) ;
- la structure cubique à faces centrées (CFC) ;
- la structure hexagonale compacte (HC).

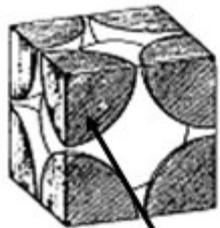
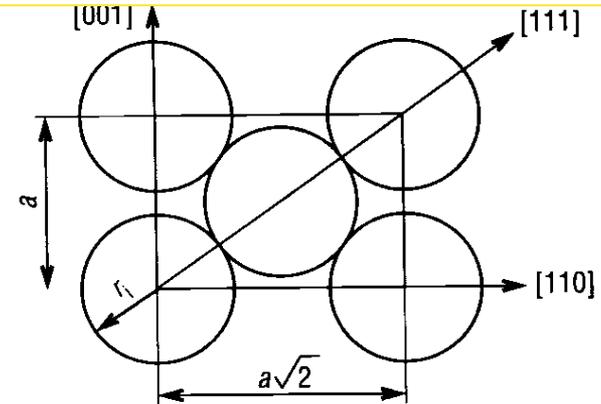
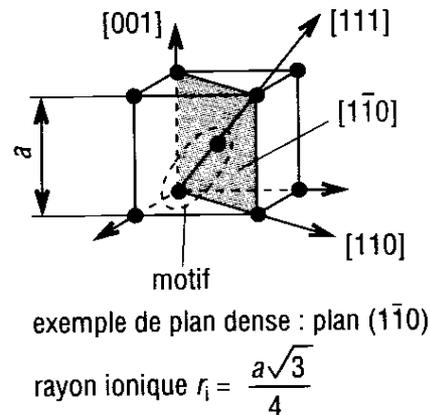
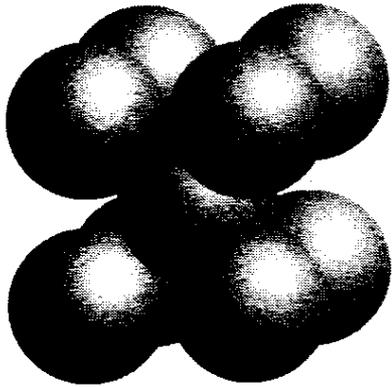
Nota: Un même élément (fer, titane, etc.) peut présenter plusieurs structures cristallines selon l'intervalle de température considéré. On dit que l'élément présente un **polymorphisme cristallin**.

Le passage d'une forme à une autre est une **transformation allotropique** ; par exemple dans le cas du *fer* : $-273^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{CC}} 912^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{CFC}} 1394^{\circ}\text{C} \xrightarrow{\text{CC}} 1538^{\circ}\text{C}$.

II. STRUCTURES CRISTALLINES DES MÉTAUX

II.1 Structure cubique centré (CC) :

Pour le système cubique centré (CC), dans la maille se trouve en plus des atomes des sommets, un atome central (Cr, W, Mo, Fe). (1 au centre + 8 aux sommets du cube mais appartenant chacun à 8 mailles). Les plans denses sont les plans $\{110\}$, et les directions denses sont les directions $\langle 111 \rangle$ (Fig. 7,8 et 9).



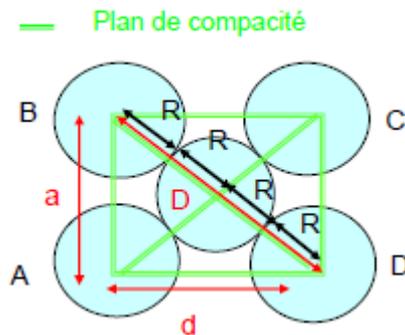
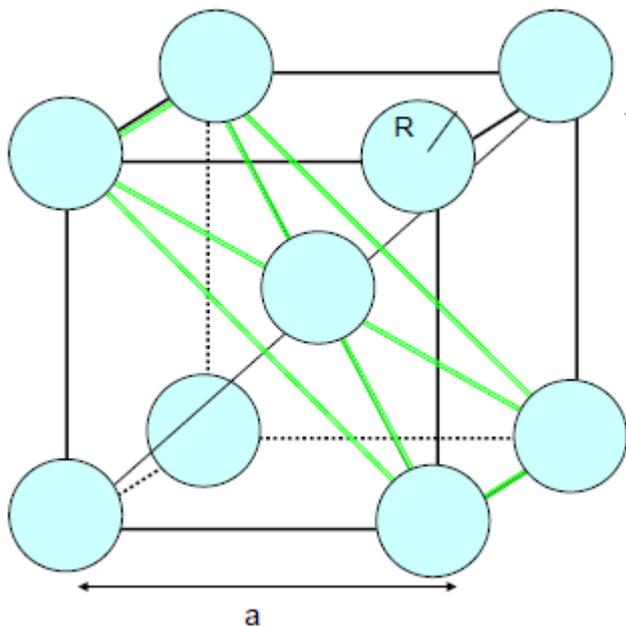
1/8 d'atome

- ✓ Relation rayon atomique-paramètre de la maille : $r = \frac{a\sqrt{3}}{4}$
- ✓ Nombre d'atome par maille : $N = 1/8 * 8 + 1 = 2$
- ✓ Plans denses :
- ✓ Directions denses :

Exemple : de métaux à maille CC : fer α , chrome, tungstène, molybdène.

II. STRUCTURES CRISTALLINES DES MÉTAUX

II.1 Structure cubique centré (CC) :



d = diagonale de la face du cube

$$d = a\sqrt{2}$$

D = diagonale du cube

$$D^2 = a^2 + d^2 = a^2 + 2a^2 = 3a^2$$

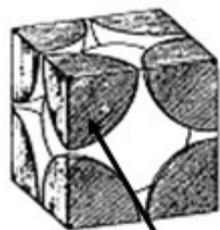
Soit:

$$D = a\sqrt{3}$$

On a aussi:

$$D = 4R$$

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



1/8 d'atome

Compacité :

Volume occupé par tous les atomes

Volume de la maille

Masse volumique :

$$\rho = \frac{N \times M}{N_a \times a^3}$$

II. STRUCTURES CRISTALLINES DES MÉTAUX

Nombre de motifs par maille

Une maille est dite unitaire si elle ne comporte qu'un seul motif, multiple si elle en comporte plusieurs. On détermine alors le nombre Z de motifs appartenant en propre à la maille. On peut faire le calcul suivant :

- un élément extérieur A à la maille compte pour 0 ;
- un élément à l'intérieur B de la maille compte pour 1 ;
- un élément au sommet C de la maille compte pour $1/8$;
- un élément sur une arête D compte pour $1/4$;
- un élément sur une face E compte pour $1/2$.

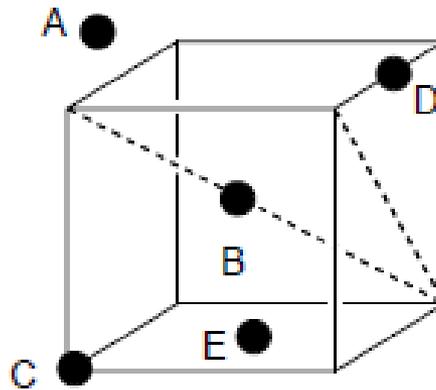
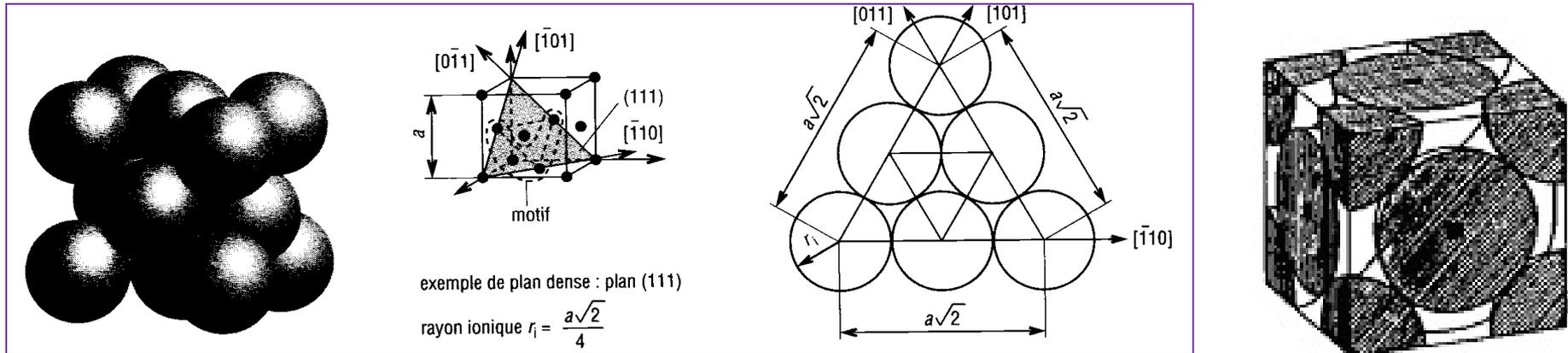


figure 5 : Positions caractéristiques d'un élément dans une maille

II. STRUCTURES CRISTALLINES DES MÉTAUX

II.2 Structure cubique à faces centrées (CFC) :

Pour le système cubique à faces centrées (CFC), dans la maille il n'y a pas d'atome au centre mais un atome au centre de chacune des six faces de cube (6 sur les faces appartenant chacun à 2 mailles + 8 aux sommets appartenant chacun à 8 mailles). Les plans denses sont les plans $\{111\}$, et les directions denses sont les directions $\langle 110 \rangle$ (Figures 10 et 11).

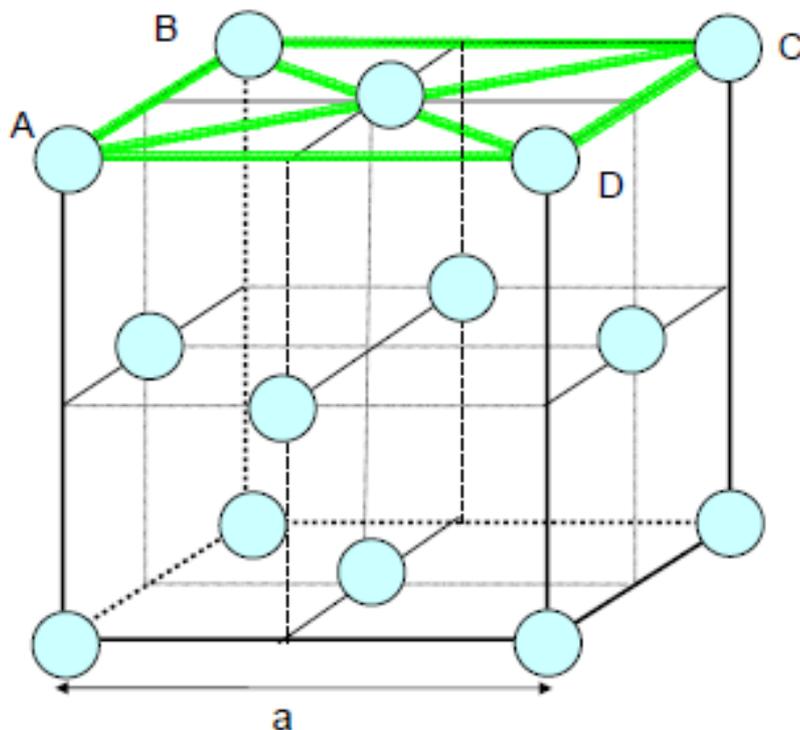


- ✓ Relation rayon atomique-paramètre de la maille : $r = \frac{a\sqrt{2}}{4}$
- ✓ Nombre d'atome par maille : $N = 1/8 * 8 + 1/2 * 6 = 4$
- ✓ Plans denses :
- ✓ Directions denses :

Exemple de métaux à maille cubique centrée : fer γ , aluminium, nickel, cuivre.

II. STRUCTURES CRISTALLINES DES MÉTAUX

II.2 Structure cubique à faces centrées (CFC) :



Descriptif:

1 atome à chaque sommet : $8 \times 1/8$

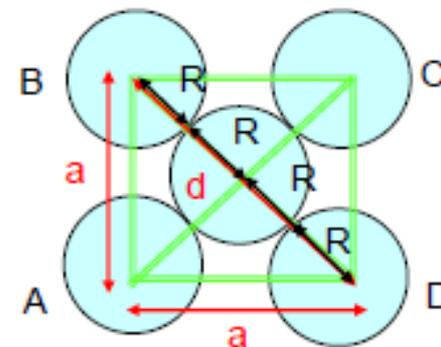
1 atome au centre de chaque face $6 \times 1/2$

= 4 atomes / maille

Paramètre de la maille

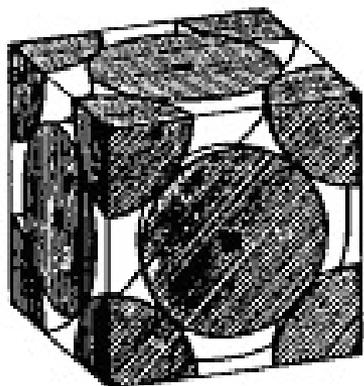
a: arête du cube

Relation entre a et R



Dans le plan de compacité, sur la petite diagonale, on a :

$$4R = a\sqrt{2}$$

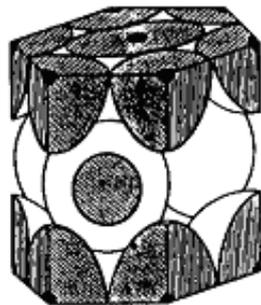
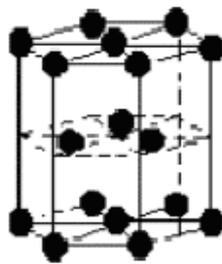
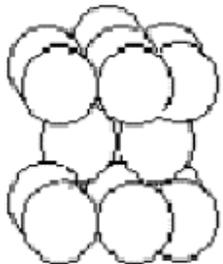
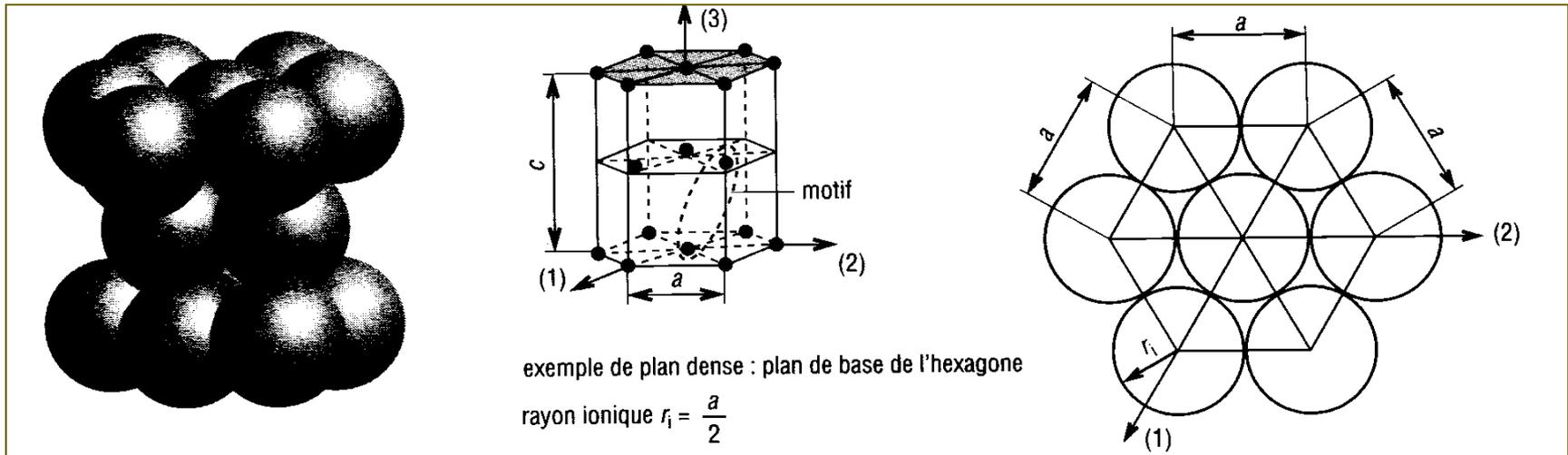


— Plan de compacité

II. STRUCTURES CRISTALLINES DES MÉTAUX

II.3 Structure Hexagonal Compact (H.C) :

La maille hexagonale représentative contient 6 ions (3 à l'intérieur + 2 sur les bases, communs chacun à 2 mailles + 12 sur les sommets, communs chacun à 6 mailles). Les plans et les directions denses sont de même type que dans le système CFC (Figures 12 et 13).



- ✓ Relation rayon atomique-paramètre de la maille : $r = \frac{a}{2}$
- ✓ Nombre d'atome par maille : $N = 1/2 \cdot 2 + 1/6 \cdot 12 + 3 = 6$
- ✓ Plans denses :
- ✓ Directions denses :

Exemple de métaux à mailles HC : **Magnésium, cobalt, titane.**

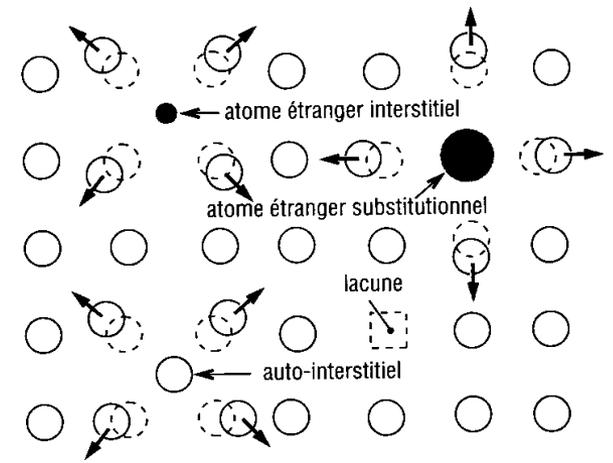
III. DÉFAUTS CRISTALLINS

Les cristaux ne sont jamais parfaits. Il y a toujours des « erreurs » dans les empilements qui peuvent être décrites comme des défauts ponctuels, linéaires et plans.

III.1 Défauts ponctuels

Ces défauts existent au niveau des dimensions atomiques. Ils peuvent résulter de la présence (fig. 15) :

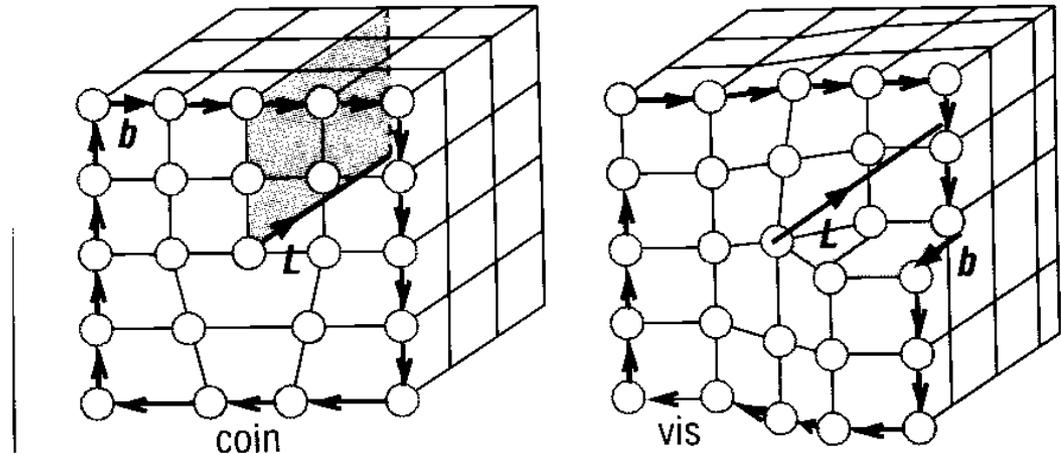
- d'un atome de la matrice en position interstitielle (auto interstitiel) ;
- d'un atome étranger en position interstitielle;
- d'un atome étranger en position substitutionnelle ;
- d'un site atomique vacant (lacune). —



III. DÉFAUTS CRISTALLINS

III.2 Défauts linéaires

Ces défauts, appelés dislocations, sont à l'origine de tous les processus liés à la déformation plastique. Toute ligne de dislocation peut se ramener à deux types: la dislocation-coin et la dislocation-vis (fig. 16).



a) Dislocation coin

Cette dislocation correspond à l'introduction d'un demi plan supplémentaire dans le réseau cristallin, qui donne l'image d'un coin.

b) Dislocation vis

Cette dislocation ne présente pas de demi-plan supplémentaire. Elle doit son nom au fait que le cristal est constitué par une rampe hélicoïdale autour de la ligne de dislocation.

III. DÉFAUTS CRISTALLINS

III.3 Défauts plans

- Surface libre : Elles séparent le solide du gaz.
- Joints de grains : Ils séparent des régions d'orientations cristallographiques différentes.
- Interfaces entre deux phases : L'interface sépare deux phases différentes.

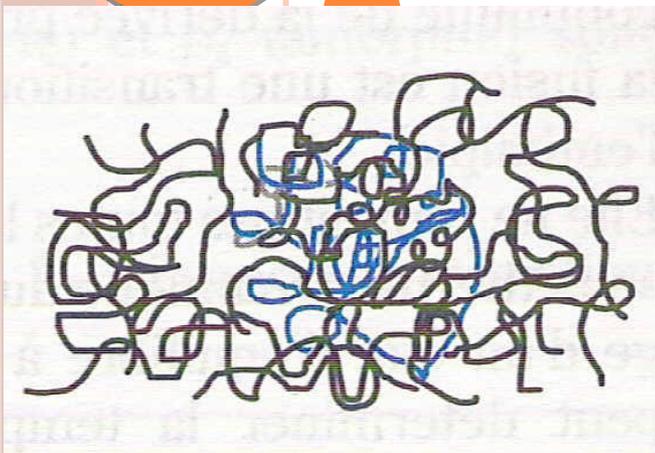
IV. STRUCTURE DES POLYMÈRES

L'échelle Supramoléculaire

L'état amorphe

- *A l'état amorphe, une chaîne se replie/ déploie dans l'espace pour adopter une configuration de pelote statistique dans laquelle on ne distingue aucun ordre à grande échelle.*

Les pelotes correspondant à des chaînes voisines sont étroitement imbriquées et enchevêtrées (fig. 8).



*Fig.8. schématisation de la structure amorphe d'un polymère. Une chaîne quelconque a été représentée en gris. Elle est étroitement **imbriquée/ enchevêtrée** avec les chaînes voisines.*

IV. STRUCTURE DES POLYMÈRES

L'échelle Supramoléculaire

L'état amorphe

Cette absence d'ordre donne au polymère une structure de liquide « figé » dont les principales caractéristiques sont les suivantes :

- *pas de point de fusion T_F ;*
- *existence d'un point de transition vitreuse T_g marquant le passage de l'état liquide/ caoutchoutique à l'état vitreux (fig. 9),*
- *transparence dans le visible. Le PS « cristal » ou le PVC « cristal » sont transparents parce qu'ils ne sont pas du tout cristallins.*

IV. STRUCTURE DES POLYMÈRES

L'échelle Supramoléculaire

L'état cristallin

Les principales caractéristiques de l'état cristallin, sont les suivantes :

- *compacité supérieure à celle de la phase amorphe, les masses volumiques ρ_c (cristalline) et ρ_a (amorphe) sont telles que, généralement : $1,0 < \rho_c / \rho_a \leq 1,15$,*
- *existence d'un point de fusion T_F , absence de transition vitreuse (fig. 12),*
- *imperméabilité totale à la plupart des gaz (sauf H₂ et He éventuellement) et vapeurs ou liquides,*
- *rigidité supérieure à celle de la phase amorphe.*

IV. STRUCTURE DES POLYMÈRES

L'échelle Supramoléculaire

L'état cristallin

Origine du caractère semi cristallin

Les polymères cristallisent lorsqu'ils ont une structure régulière. Ils ne cristallisent jamais totalement pour différentes raisons:

- La présence d'irrégularités structurales (en particulier ramifications).

Ces dernières sont exclues des cristaux au cours de leur croissance.

Notons que la copolymérisation peut être un moyen d'introduire du désordre dans la chaîne pour empêcher sa cristallisation.

Exemple: copolymères (éthylène - alcènes supérieurs).

- La lenteur des réarrangements conformationnels permettant à la chaîne d'intégrer les zones d'ordre cristallin.

Exemple: PEEK.

○ FIN

