

Propriétés de base des matériaux

Support de Cours

Pr. Rachid EL BOUAYADI

Département GERST

ENSA

Univ. Ibn Tofail

rachid.elbouayadi@uit.ac.ma



Intro.

Matériaux

ENSAK



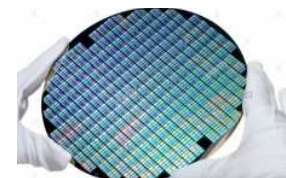
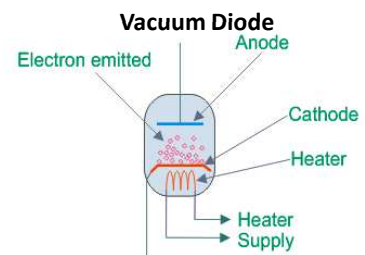
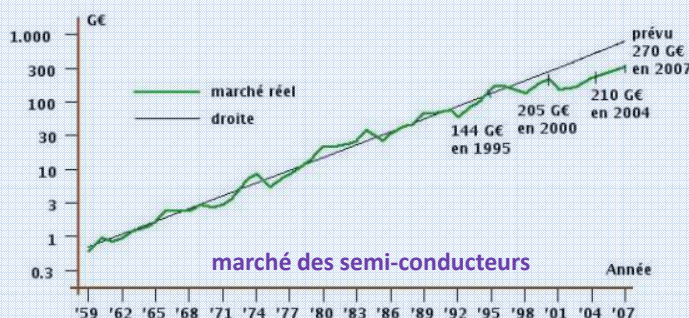
I. Introduction

Tout progrès technologique important est souvent lié au développement de **matériaux** dotés de propriétés améliorées ou nouvelles.

EXEMPLE 1 : la microélectronique

- Le terme « électronique » trouve son origine dans l'utilisation des **tubes à vide** dont le fonctionnement repose sur un courant d'électrons (rayons cathodiques découverts par J. J. Thomson en 1897).

Pourtant, l'explosion des applications de l'électronique sont dus à l'utilisation des matériaux semi-conducteurs, principalement le **Silicium (l'or gris)**.



Silicon wafer



EXEMPLE 2 : automobile

Dans le développement d'une technologie, il est fréquent de **substituer** un **matériau** à un autre : pour des raisons de performance, ou pour des motifs économiques ou écologiques.

carrosseries de voiture : Initialement, ces carrosseries étaient construites en bois. Progressivement, le bois a été remplacé par le **métal**, ce dernier étant à son tour partiellement supplanté par des **polymères** organiques.



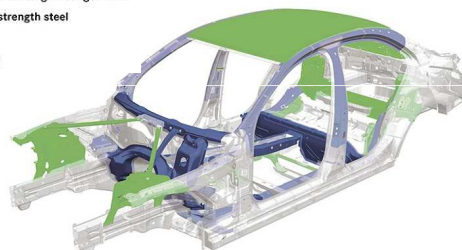
3



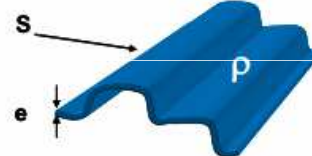
EXEMPLE 2 : automobile

On **allège** les carrosseries en utilisant des tôles d'acier plus **minces** à haute résistance produites par une meilleure connaissance des mécanismes de durcissement (aciers à grains fins) ou par l'emploi de tôle **d'aluminium**.

- Hot-formed ultra-high-strength steel
- Ultra-high-strength steel
- Steel
- Aluminium



$$\text{masse} = e \cdot \rho \cdot S$$



Cependant, les matériaux plus légers (**masse volumique** $\rho < 8 \text{ g.cm}^{-3}$ pour l'**acier**) ont des propriétés mécaniques moins élevées que celles des matériaux traditionnels comme les aciers. Pour des applications qui font intervenir des contraintes mécaniques, il faut prendre en considération le rapport E/ρ pour choisir le type de matériaux à utiliser. La valeur de ce rapport est pratiquement équivalente pour les aciers et pour l'aluminium.

4



ALLÉGER LES MATÉRIAUX POUR RÉDUIRE LA CONSOMMATION DE CARBURANT ET LES ÉMISSIONS DE CO₂



GM INTRODUCES MAGNESIUM SHEET METAL

General Motors' innovative process for making lightweight, corrosion resistant, magnesium sheet metal structural panels is expected to help make vehicles more fuel efficient.



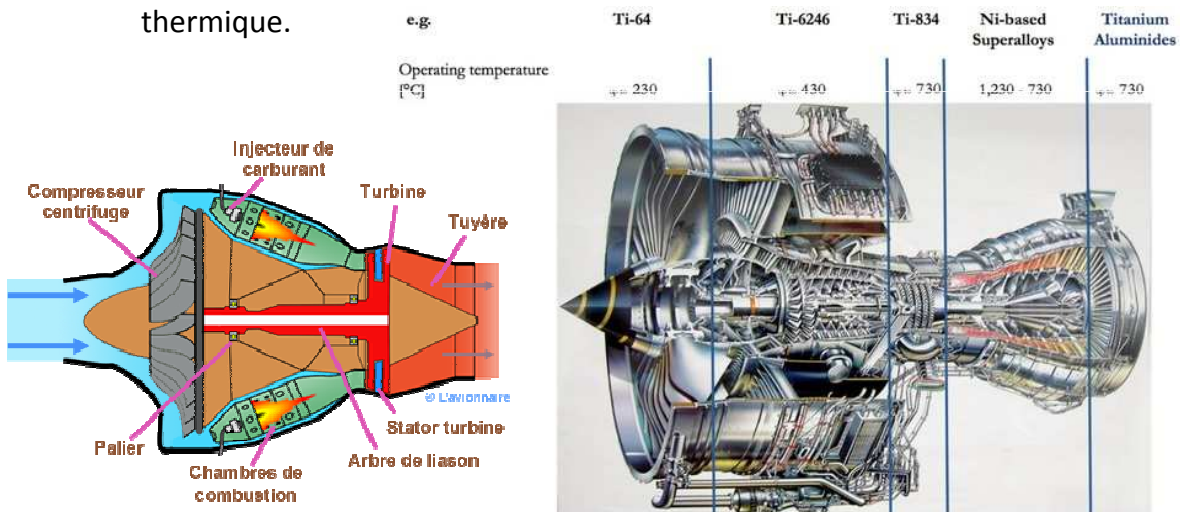
75% lighter than steel

33% lighter than aluminum



EXEMPLE 3 : aéronautique

il est possible d'augmenter de manière substantielle le rendement énergétique des turbines à gaz (réacteurs d'avion) en travaillant à température plus élevée. La mise au point de moteurs plus performants est cependant conditionnée par la mise au point **d'alliages métalliques** plus résistants au fluage ou de **céramiques** ayant une meilleure tenue au choc thermique.





I.1. Définition

De manière symbolique et résumée, un **matériau** est une matière dont on fait un matériel.

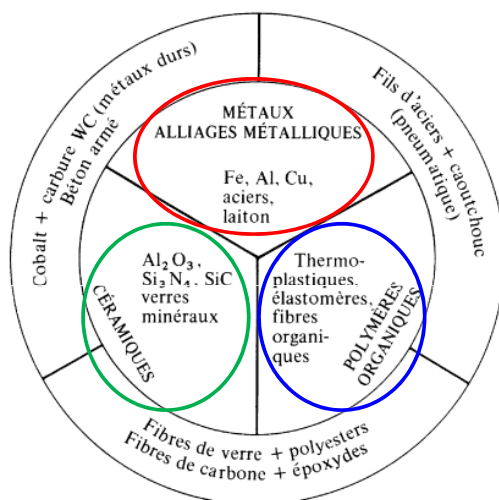
Matériau = Solides utilisés par l'homme pour la fabrication d'objets qui constituent le support de son cadre de vie.

Les propriétés des matériaux sont définies par la nature des **liaisons chimiques**, l'**arrangement atomique** et la **microstructure**. L'étude des relations entre l'organisation à l'échelle atomique, la microstructure et les propriétés des matériaux, constitue le domaine de la **Science des Matériaux**.

7



I.2. Classification



• les métaux et leurs alliages (**liaisons métalliques**);

• les polymères organiques (**liaisons covalentes** et liaisons secondaires);

• les céramiques (**liaisons ioniques** et liaisons covalentes).

Les trois types de matériaux peuvent être combinés pour former des matériaux **composites** : constitués de deux ou de plusieurs matériaux différents qui combinent de manière synergique leurs propriétés spécifiques (un composite léger et à haute résistance mécanique).

8



1.3. propriétés des matériaux

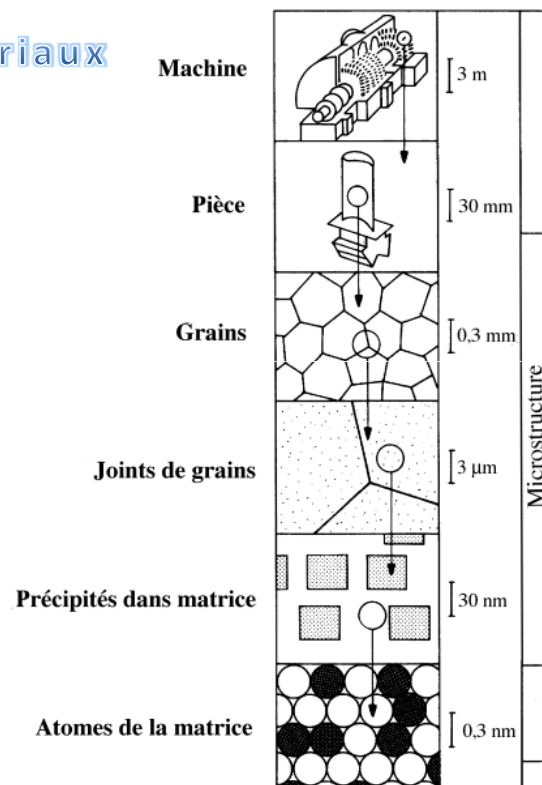
On caractérise une propriété d'un matériau en analysant la réaction du matériau à une sollicitation extérieure. Selon le type de sollicitations extérieures, on distingue trois catégories de propriétés :

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



1.3. propriétés des matériaux

La science des matériaux a pour objectif d'établir les relations existant entre la composition et **l'organisation atomique** ou moléculaire, la **microstructure** et les propriétés macroscopiques des matériaux.





I. Généralités

L'état gazeux : les molécules sont éloignées les unes des autres et sont animées d'une vitesse élevée.

L'état liquide : les molécules sont proches les unes des autres. Elles peuvent glisser les unes sur les autres.

L'état cristallin : les atomes sont maintenus à des emplacements fixes. Ils vibrent sans s'écarter trop de leur place.

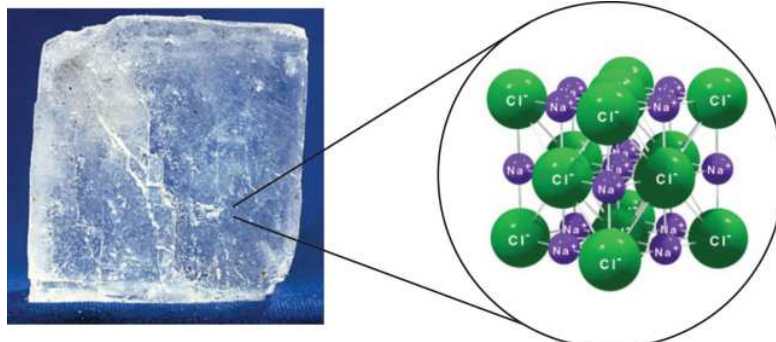
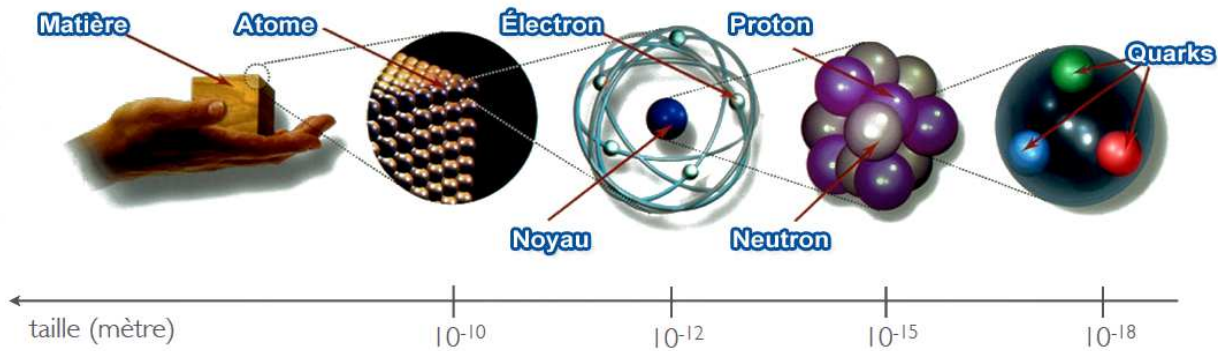
Plutôt que de distinguer les états solide, liquide et gazeux, il convient d'opposer les états **ORDONNES** et **NON ORDONNES**

États **NON ORDONNES** : Particules constituantes réparties **au hasard**

→ Les gaz et la plupart des liquides et certains solides

États **ORDONNES** : Particules constituantes réparties **régulièrement**

→ **Solides cristallisés**



Dans l'état cristallin, les molécules sont arrangées selon une configuration parfaitement géométrique



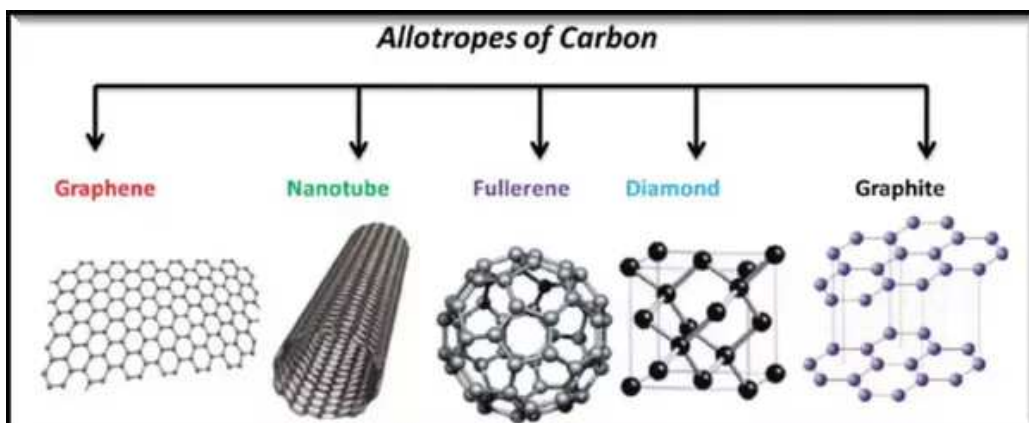
Définition: L'**allotropie** (du grec allos : autre et tropos matière) est la faculté de certains corps simples d'exister sous plusieurs formes cristallines ou moléculaires différentes.

Les **transformation allotropiques** sont induites par les conditions extérieures (température et pression).



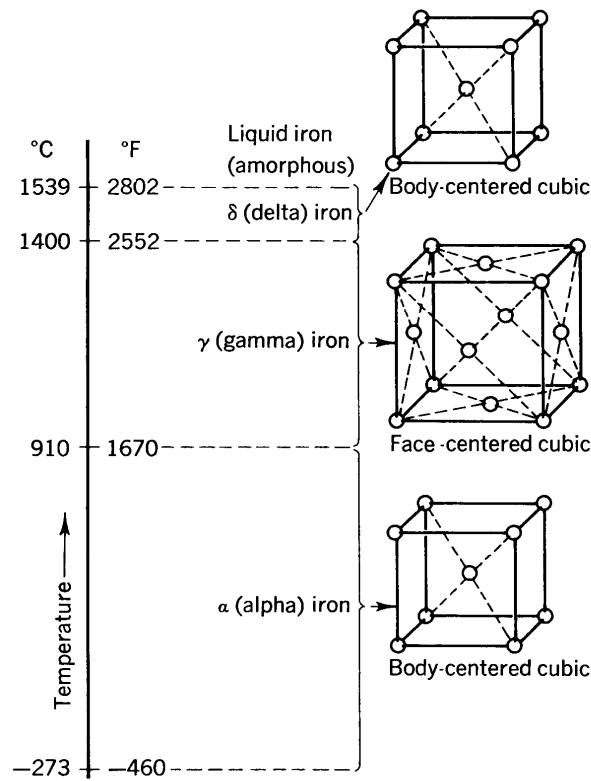
Les différentes formes allotropiques du Carbone

- Empilement amorphe: charbon
- Empilement sur base cubique: diamant
- Empilement à base hexagonale: graphite
- Fibres de carbones
- fullerène: C₆₀ forme de ballon
- Nanotube: enroulement de graphène





LES DIFFÉRENTES FORMES ALLOTRIQUES DU FER



MAILLE ÉLÉMENTAIRE

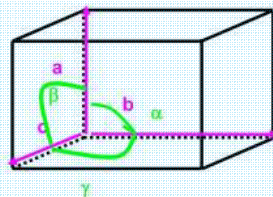
Cristallographie : Description géométrique de la disposition dans l'espace des éléments (atomes, ions ou molécules) étant considérés comme constituant un cristal.

Ces éléments sont des particules sphériques.

Maille élémentaire : Plus petit édifice d'atomes permettant de reconstituer le cristal par répétition périodique du motif dans les trois directions de l'espace.

L'ensemble des mailles superposées constitue le **réseau cristallin**

On appelle **axes cristallins** les axes Ox , Oy et Oz

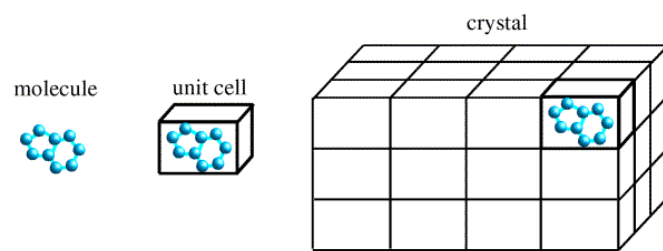
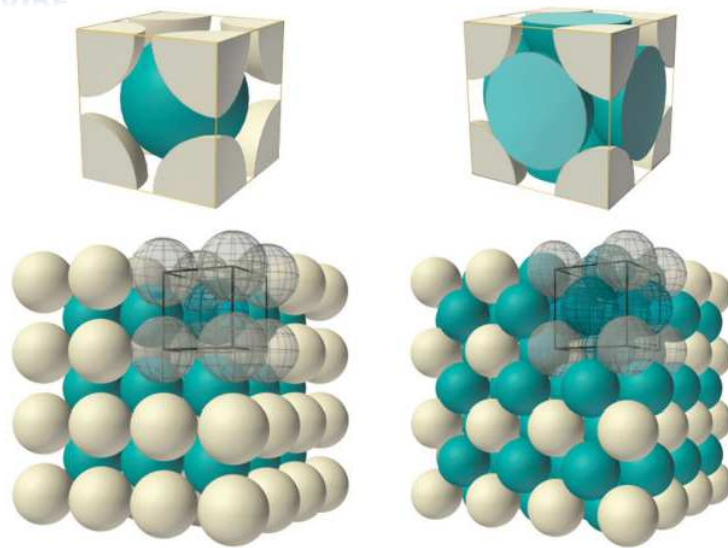


La maille peut être décrite par:

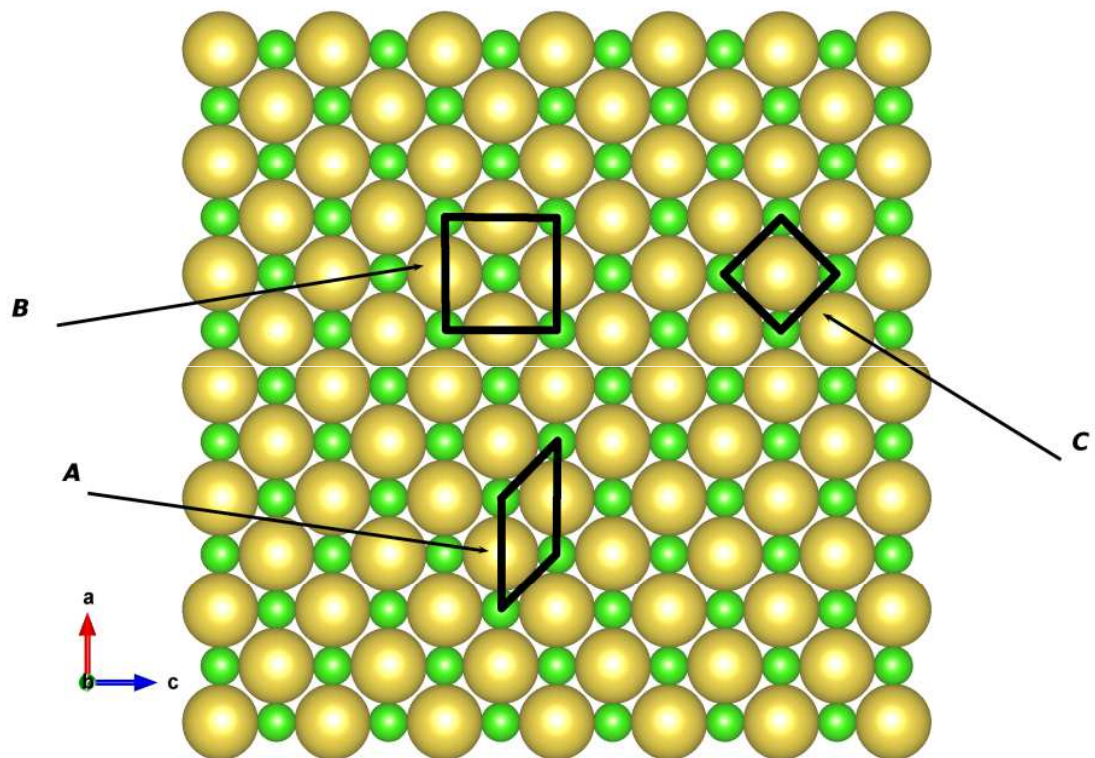
- les longueurs des arêtes a , b , c ;
- les angles α , β , γ ;
- la nature, le nombre et les positions des atomes formant cet édifice.

7 systèmes cristallins ↔ **14 réseaux de Bravais**

MAILLE ÉLÉMENTAIRE



MAILLE ÉLÉMENTAIRE À 2D



notions de motif, de réseau et de maille (réseaux à 2 dimensions)

dans un espace à deux dimensions nous prenons une origine et deux vecteurs non colinéaires pour définir un repère. Les deux vecteurs \mathbf{a} et \mathbf{b} sont caractérisés en particulier par leur longueur a et b et par l'angle γ entre leurs directions.

Quels sont les différentes possibilités pour ces trois paramètres a , b et γ ?

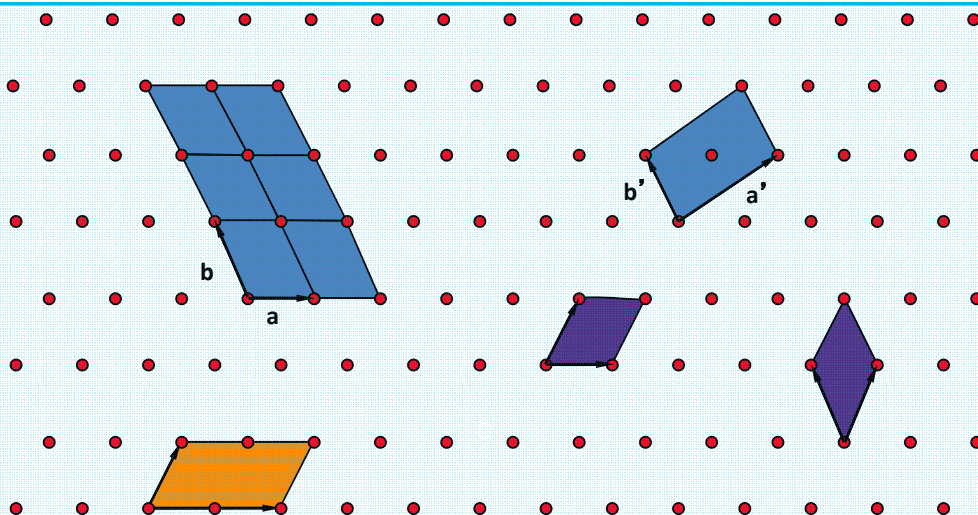
| | | | |
|------------|---------------------|---------------|--------------------|
| $a \neq b$ | γ quelconque | \Rightarrow | parallélogramme |
| $a \neq b$ | $\gamma = \pi/2$ | \Rightarrow | rectangle |
| $a = b$ | γ quelconque | \Rightarrow | losange |
| $a = b$ | $\gamma = 2\pi/3$ | \Rightarrow | losange à $2\pi/3$ |
| $a = b$ | $\gamma = \pi/2$ | \Rightarrow | carré |

A partir de ces différents repères on peut définir des ensembles de points qui sont les extrémités des vecteurs $\mathbf{R} = u\mathbf{a} + v\mathbf{b}$ avec u et v des nombres entiers

Ces ensembles de points constituent des réseaux. Les points sont appelés nœuds du réseau.

19

notions de motif, de réseau et de maille (réseaux à 2 dimensions)



La surface d'une maille est donné par le produit vectoriel des deux vecteurs \mathbf{a} et \mathbf{b} :

$$S = |\mathbf{a} \wedge \mathbf{b}| = |\mathbf{a}| |\mathbf{b}| \sin(\mathbf{a}, \mathbf{b})$$

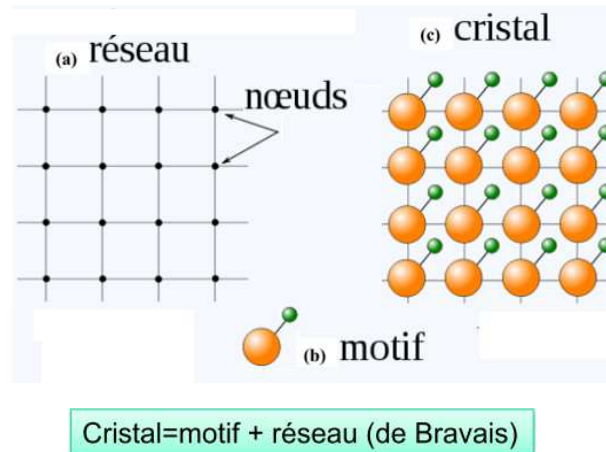
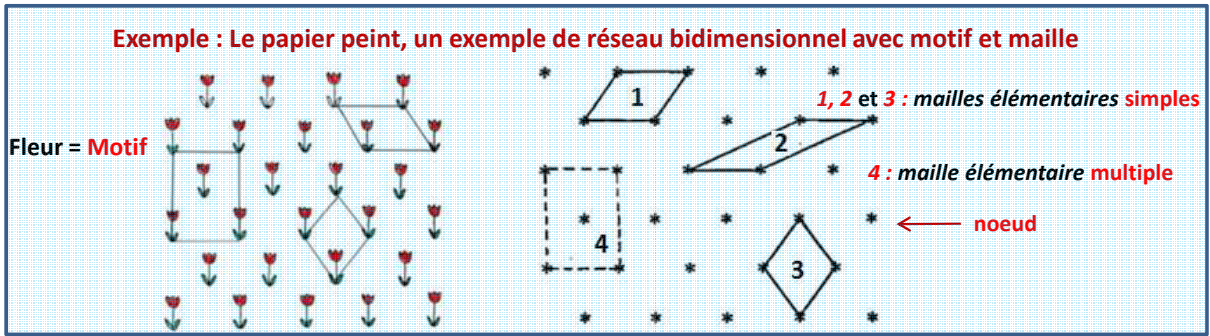
Toutes les mailles primitives ont la même surface, les mailles d'ordre n ont une surface égale à nS (n est égal au nombre de nœuds dans la maille).

Exemple : $\mathbf{a}' = 2\mathbf{a} + \mathbf{b}$ $\mathbf{b}' = \mathbf{b}$

$$S' = |\mathbf{a}' \wedge \mathbf{b}'| = |(2\mathbf{a} + \mathbf{b}) \wedge \mathbf{b}| = |2\mathbf{a} \wedge \mathbf{b} + \mathbf{b} \wedge \mathbf{b}| = |2\mathbf{a} \wedge \mathbf{b}| = 2S$$

20

notions de **motif**, de **réseau** et de **maille** (réseaux à 2 dimensions)



21

notions de **motif**, de **réseau** et de **maille** (réseaux à 2 dimensions)

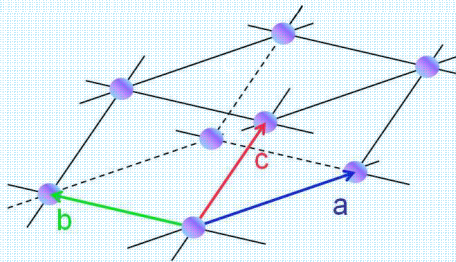
On peut maintenant compléter le tableau au niveau des différents systèmes.

| | | Maille | Système |
|------------|---------------------|----------------------------------|---|
| $a \neq b$ | γ quelconque | \Rightarrow parallélogramme | \Rightarrow oblique |
| $a \neq b$ | $\gamma = \pi/2$ | \Rightarrow rectangle | \Rightarrow rectangulaire |
| $a = b$ | γ quelconque | \Rightarrow losange | \Rightarrow rectangulaire centré |
| $a = b$ | $\gamma = 2\pi/3$ | \Rightarrow losange à $2\pi/3$ | \Rightarrow hexagonal |
| $a = b$ | $\gamma = \pi/2$ | \Rightarrow carrée | \Rightarrow carré |

22

Les réseaux de Bravais (réseaux à trois dimension)

Dans un espace à **3 dimensions** : prenons une origine et trois vecteurs non colinéaires (repère). Les trois vecteurs **a**, **b** et **c** sont caractérisés par leur longueur **a**, **b** et **c** et par les angles α , β et γ entre leurs directions.



Quels sont les différentes possibilités pour ces six paramètres?

physicien français - 19^e s.

Triclinique
 $a \neq b \neq c$
 $\alpha \neq \beta \neq \gamma$

Monoclinique
 $a \neq b \neq c$
 $\alpha = \gamma = 90^\circ; \beta$

Orthorhombique
 $a \neq b \neq c$
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

Tétragonal
 $a = b \neq c$
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

Rhomboédrique
 $a = b = c$
 $\alpha = \beta = \gamma$

Hexagonal
 $a = b \neq c$
 $\alpha = \beta = 90^\circ; \gamma = 120^\circ$

Cubique
 $a = b = c$
 $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

- À 3D
- 7 systèmes (symétrie)
- 14 modes de réseau

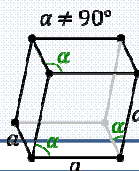
• Les systèmes de Bravais

23

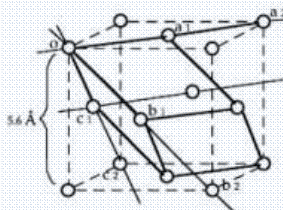


Cristaux cubiques de halite le chlorure de sodium NaCl

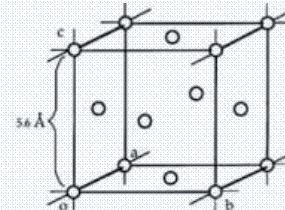
sel de cuisine



Maille primitive et maille multiple (3D)



Maille simple, définie par un rhomboèdre dont les nœuds occupent les sommets.



Maille multiple, définie par un cube dont les nœuds occupent les sommets et le milieu des faces.

Les particules constituantes peuvent être:

DES ATOMES

Les cristaux métalliques

Les cristaux covalents

DES IONS

Les cristaux ioniques

DES MOLECULES

Les cristaux moléculaires

Les **solides** peuvent être classés en fonction des **liaisons** qui lient les atomes et les molécules entre eux. Cette classification permet de déterminer des solides ioniques, métalliques, covalents et moléculaires.

II. Les cristaux métalliques

Formés d'**ATOMES** de métal

Ce qui distingue les métaux des non métaux est leur **liaison interatomiques**

la cohésion est assurée par des liaisons métalliques

La plupart des métaux comme la plupart des solides ont des structures cristallines

Réseau cubique centré

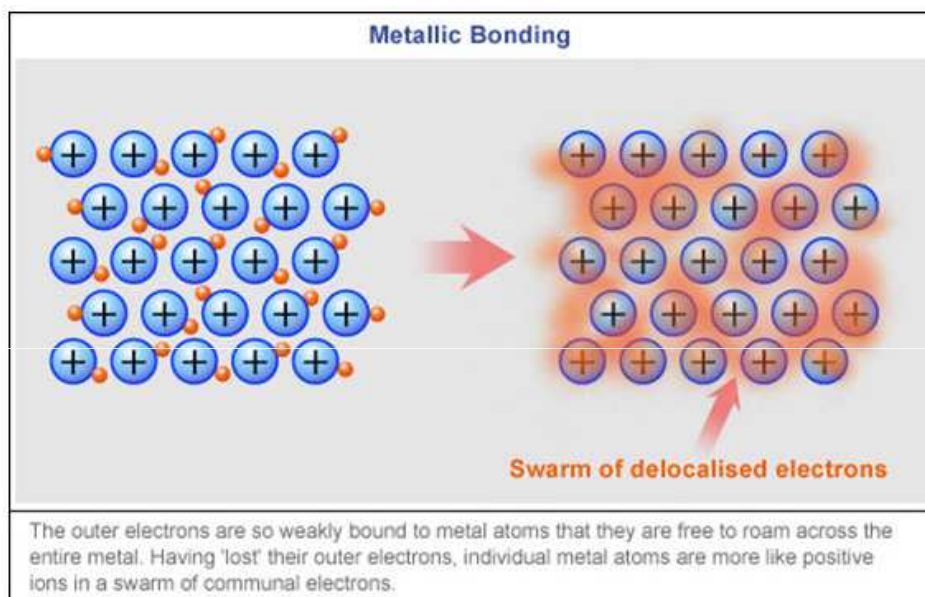
Réseau cubique faces centrées

Réseau hexagonal compact

Liaison métallique : Chaque atome fournit un électron à un bain universel d'électrons, et les ions positifs qui sont les atomes baignent dans la mer des électrons négatifs. La mer électronique maintient les cations ensemble comme une sorte de colle = gaz d'électrons libres entre les ions

25

II. Les cristaux métalliques



Les **électrons libres** sont délocalisés sur l'ensemble de la structure métallique : **électrons de conduction**

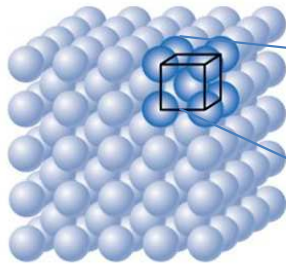
26

II. Les cristaux métalliques

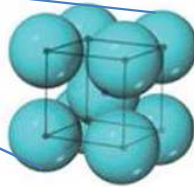
II.1. Structure cubique centrée : C.C

Exemples :

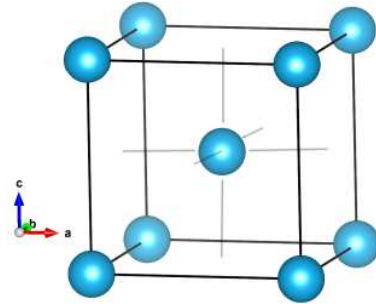
- métaux alcalins : Li , $[Na]$, K , Rb , Cs
- métaux de transition : Fe_{α} , Mo



Amas d'atomes



Maille élémentaire
(polyèdre compact)



Maille élémentaire
(polyèdre éclaté)



27

II. Les cristaux métalliques

II.1. Structure cubique centrée : C.C

— Plan de compacité

Paramètre de la maille

a: arête du cube

Descriptif:

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

+ 1 atome au centre du cube : + 1

= 2 atomes / maille

1/8 atom at each corner
8 corners * 1/8 = 1 atom

1 atom in center

1 corner atom +
1 center atom
= 2 atoms total per unit cell

La densité atomique d'un plan

$$\rho = \frac{\text{atoms}}{\text{surface}} = \frac{[1]}{[nm^2]}$$

28

II. Les cristaux métalliques

II.1. Structure cubique centrée : C.C

Relation entre a et R

Relation entre a et R

d = diagonale de la face du cube $\Rightarrow d = a\sqrt{2}$

D = diagonale du cube $\Rightarrow D^2 = a^2 + d^2 = a^2 + 2a^2 = 3a^2$

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

On a aussi: $D = 4R$

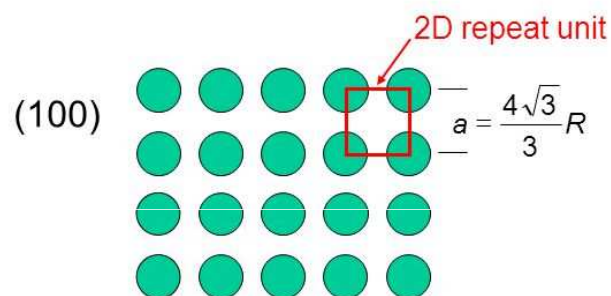
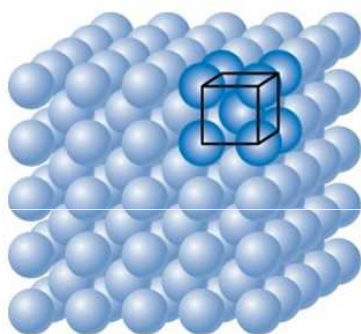
$4R = a\sqrt{3}$

29

Densité atomique d'un plan

Planar Density of (100) Iron

Solution: At $T < 912^\circ\text{C}$ iron has the BCC structure.



Radius of iron $R = 0.1241 \text{ nm}$

atoms

2D repeat unit $\rightarrow 1$

area

2D repeat unit

$$\text{Planar Density} = \frac{\text{atoms}}{\text{area}} = \frac{1}{\left(\frac{4\sqrt{3}}{3}R\right)^2} = 12.1 \frac{\text{atoms}}{\text{nm}^2} = 1.2 \times 10^{19} \frac{\text{atoms}}{\text{m}^2}$$