

Chapitre 1

Notions de base sur la physique du solide

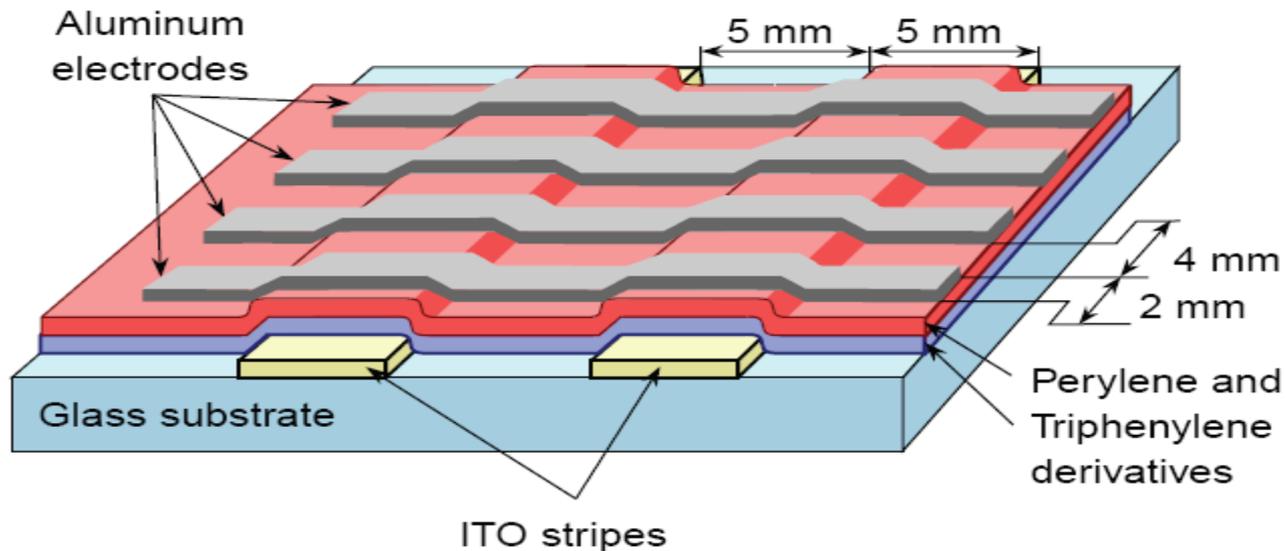
- Les transistors bipolaires ou **MOSFET**, (Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor)
- Diodes électroluminescentes (**LED**), (Light-Emitting Diode).
- Circuits intégrés (**CI**)

L'utilisation de semi-conducteur sous forme cristalline remonte au début du siècle dernier. On constata que la galène (**sulfure de plomb polycristallin**) jouait le rôle d'une diode lorsqu'on réalisait un contact entre une pointe métallique et un de ses cristaux. Les redresseurs à l'oxyde de cuivre, puis au silicium ont été également utilisés, grâce à leur caractère

Chapitre 1

Notions de base sur la physique du solide

Vers 1942-1945, on fabrique le premier monocristal de germanium (Ge).
L'équipe de la Bell, formée de **Shockley**, Bardeen et Brattain crée, en 1947, le premier **transistor bipolaire à jonctions**.



Chapitre 1

Notions de base sur la physique du solide

En 1952, ce dernier publie la théorie du transistor à effet de champ ; Dacey et Ross réalisent le premier élément en 1953, avec du germanium. Puis le **silicium (Si)** prend peu à peu l'avantage sur le **Germanium (Ge)**, grâce à sa gamme de température d'utilisation plus large et son traitement plus facile.

En 1962, Hofstein et Heiman réalisent le premier **transistor MOS**. Vers la même époque, en 1959, brevète le circuit intégré en 1960.

-

Chapitre 1

Notions de base sur la physique du solide

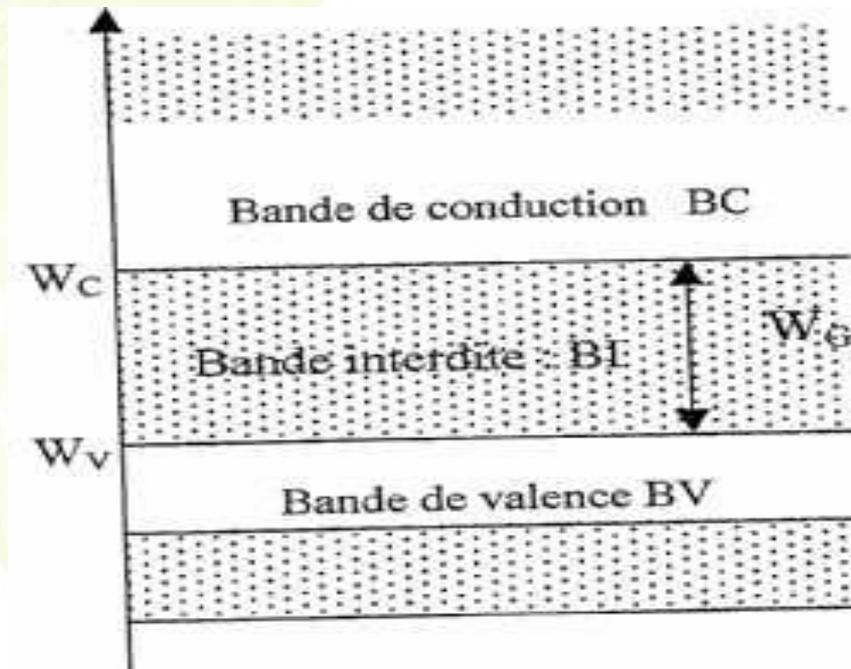


Chapitre 1

Notions de base sur la physique du solide

1.2- Définitions

Gap = bande interdite (eV) (*electron-volts*)



Chapitre 1

Notions de base sur la physique du solide

Trois catégories de matériaux :

-Un **matériau isolant** possède un gap élevé. Tous les électrons de la couche périphérique sont utilisés dans les liaisons chimiques covalentes. A la température de 0 K, il n'y a pas d'électrons dans la bande de conduction.

Exemples : isolants (verre, diamant, . . .) : $\rho = 10^{10} \text{ à } 10^{22} \Omega \text{ cm}$. (Résistivité)

Chapitre 1

Notions de base sur la physique du solide

Dans les **isolants**, les bandes d'énergie les plus faibles sont pleines. La hauteur de la bande interdite est grande (» **5 eV**). Il n'y a pas de niveaux d'énergie accessibles et pas de conduction. Par exemple, la résistivité du diamant est :

$\rho = 1 \cdot 10^{12} \Omega \cdot m$ et celle du mica varie entre **$10^{10} W \cdot m$** et **$10^{15} \Omega \cdot m$** .

La hauteur de la bande interdite est grande (» **5 eV**). Il n'y a pas de niveaux d'énergie accessibles et pas de conduction. Par exemple, la résistivité du diamant est **$\rho = 1 \cdot 10^{12} W \cdot m$** et celle du mica varie entre **$10^{10} W \cdot m$** et **$10^{15} \Omega \cdot m$** .

-Dans un **matériau conducteur**, les liaisons chimiques n'utilisent pas tous les électrons de la couche périphérique. Ceux qui sont alors libres de circuler et se déplacent naturellement dans la bande de conduction (même à **0 K**). Ceci se traduit par un gap nul ou négatif : les bandes de conduction et de valence se chevauchent.

Dans les **conducteurs**, la dernière bande occupée est partiellement remplie : il existe beaucoup de niveaux disponibles et la conduction est grande. Pour des métaux bons conducteurs, on obtient :

Métaux

- L'argent (Ag) : $\rho_{\text{Ag}} = 1,6 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$;
- Cuivre (Cu) : $\rho_{\text{Cu}} = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$;
- Aluminium (Al) : $\rho_{\text{Al}} = 2,8 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$

- **Semi-conducteur (SC)** matériaux qui ne sont ni conducteurs, ni isolants

Un **matériau semi-conducteur (SC)** est un isolant possédant un faible gap. Il est parfaitement isolant à **0 K**, mais devient progressivement conducteur lorsque la température augmente ou par apport d'énergie sous une forme quelconque (lumière ou tout rayonnement électromagnétique, chauffage, etc.).

Pour les **semi-conducteurs**, le taux de remplissage de la dernière bande occupée est soit très faible soit très important. La hauteur de la bande interdite est faible ($\gg 1$ eV). La conduction est faible et varie beaucoup avec la température. Pour le silicium et le germanium, on mesure à **300 K** :

-Exemples :

(**Ge, Si, GaAs, GaN**, . . .) : ρ varie de $10^{-3}\Omega \text{ cm}$ a $10^9 \Omega \text{ cm}$

.- Les semi-conducteurs

- Ils se placent entre les conducteurs et les isolants.
- Ils possèdent une résistivité intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants :

Ils se comportent comme des **isolants** aux basses températures lorsque l'agitation thermique est faible et comme des **conducteurs** aux températures élevées.

- La résistivité d'un semi-conducteur diminue quand la température augmente



-Exemples :

(**Ge, Si, GaAs, GaN**, . . .) : ρ varie de $10^{-3}\Omega$ cm a $10^9 \Omega$ cm

.- Les semi-conducteurs

- Ils se placent entre les conducteurs et les isolants.
- Ils possèdent une résistivité intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants :

Ils se comportent comme des **isolants** aux basses températures lorsque l'agitation thermique est faible et comme des **conducteurs** aux températures élevées.

- La résistivité d'un semi-conducteur **diminue** quand la température augmente



- Entre les métaux et les isolants se trouvent les semi-conducteurs (**SC**) dont la résistivité varie de 10^{-3} à $10^4 \Omega \text{ cm}$

Les corps simples semi-conducteurs sont obtenus dans le groupe IV de la classification périodique des éléments. Ce sont le germanium, et surtout le silicium.

Le tableau (I.1) donne des exemples de matériaux ou de composés semi-conducteurs en fonction des éléments qui les constituent et de la position de ces éléments dans le tableau de Mendelév.



Tableau 1.1. Exemples de Semi-Conducteurs.

Colon		Semi-conducteur
IV		Ge, Si
III-V	binaire	GaAs, GaP, GaSb, InAs, InP, InSb
		$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$, $\text{GaAs}_y\text{P}_{1-y}$
	ternair	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$
II-VI	binaire	CdS, HgTe, CdTe, ZnTe, ZnS
	ternair	$\text{CdxHg}_{1-x}\text{Te}$

Chapitre 1

3-La structure cristalline

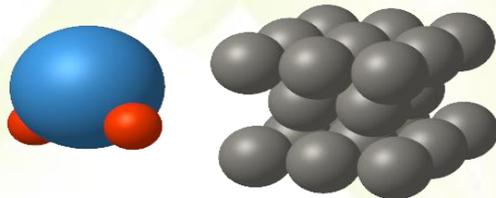
3-1-Etats physiques de la matière :

Les trois états les plus classiques de la matière , selon la Température et la Pression sont : **Solide** , **Liquide** et **Gazeux**.

Qu'est qu'un cristal ?

Est un structure organisée de la matière sous forme solide, ou est constituée d'un assemblage régulier d'atomes ou de molécules (Figure 1).

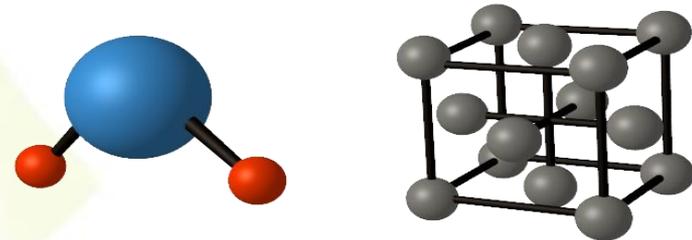
modèle compact



molécule

cristal

modèle éclaté

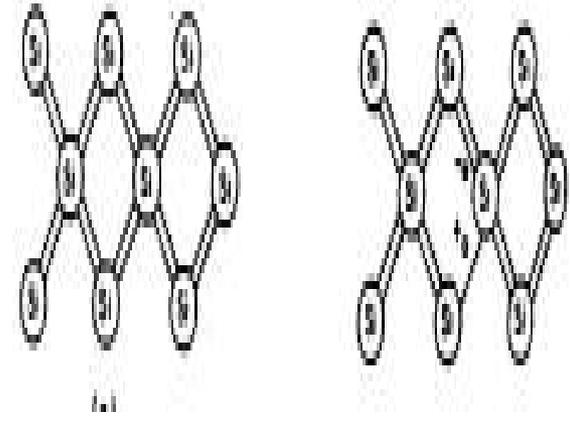
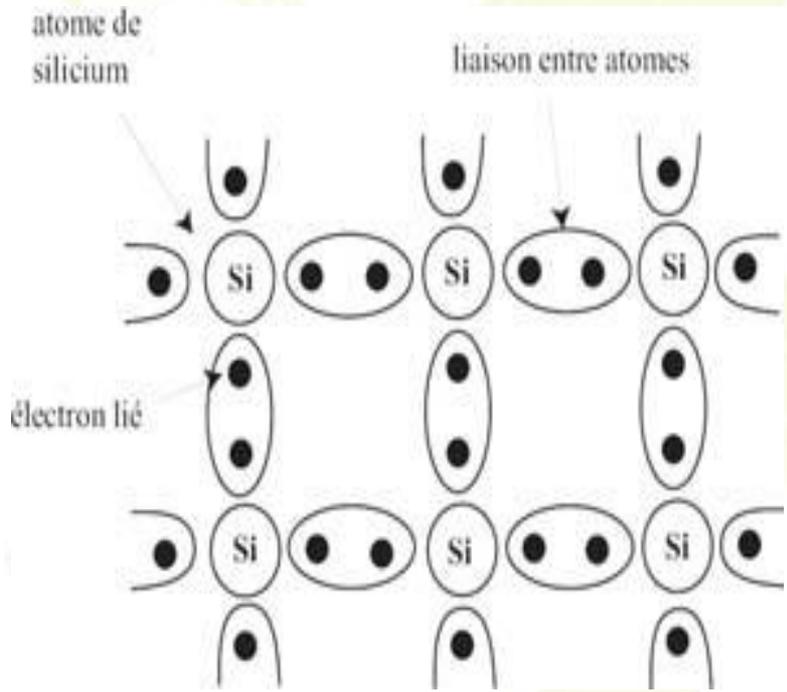


molécule

cristal



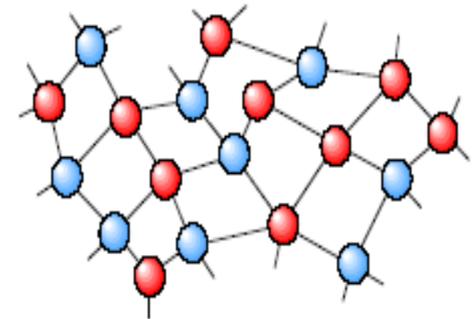
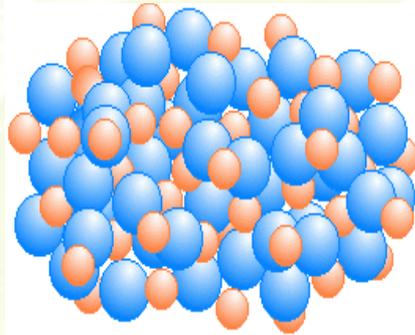
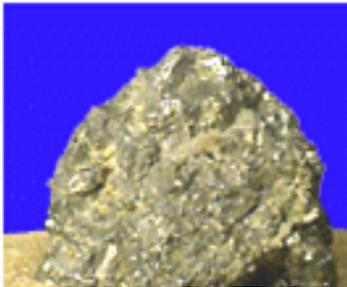
La couche électronique périphérique assure la stabilité de l'atome. Elle est complète lorsqu'elle comporte 8 électrons pour atteindre la **saturation**.



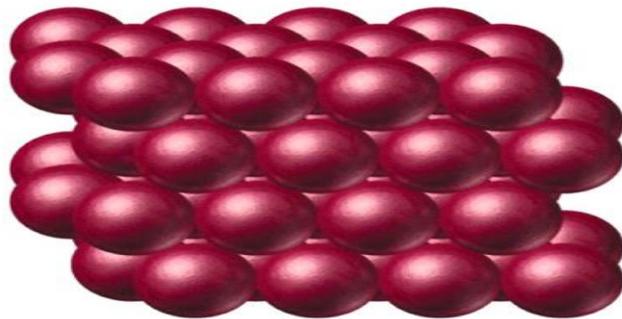
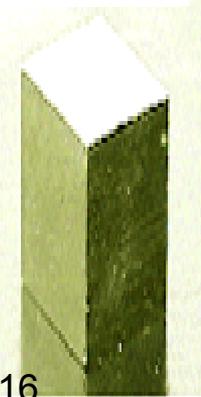
3.2-Types de solides

Nous distinguons deux types d'arrangements :

1- **les solides amorphes** ou verres, dans lesquels l'assemblage des entités ne présente pas d'ordre à grande distance.)

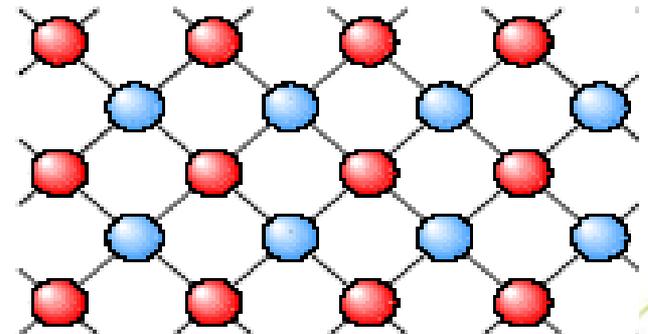


2- **les solides cristallins** où, l'assemblage est très régulier.



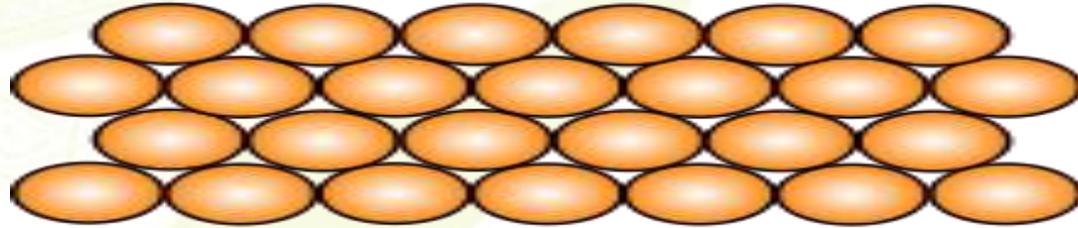
(a)

Crystalline
solid

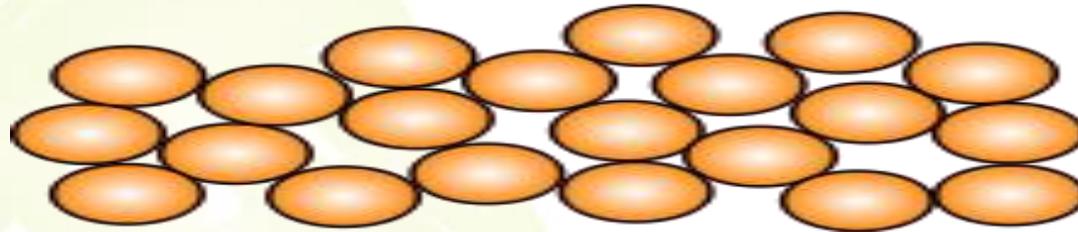


.la différence entre un matériaux amoprhe et un matériaux cristallins.

cristal



amorphe



Est alors défini un modèle de solide cristallin parfait, où l'ordre serait généralisé dans les trois dimensions.

En fait dans les solides cristallisés, nous retrouvons un assemblage de

17 microdomaines dans lesquels l'ordre est parfait.

3-4-Outils de description géométrique des cristaux

3- 4-1- Motif

On nomme **motif**, le plus petit groupement d'atomes. L'observation de la surface d'un solide à l'aide d'un microscope à effet tunnel (**M.E.T.**) met en évidence la structure régulière et périodique des solides cristallisés (*figure*)

[

Figure () – Image par M.E.T. d'un cristal de silicium (plan (1,1,1))

Exemple :

1- Le chlorure de sodium NaCl (sel de cuisine)



(ici Na et Cl) qui répété dans les trois directions de l'espace, reconstitue tout le cristal.

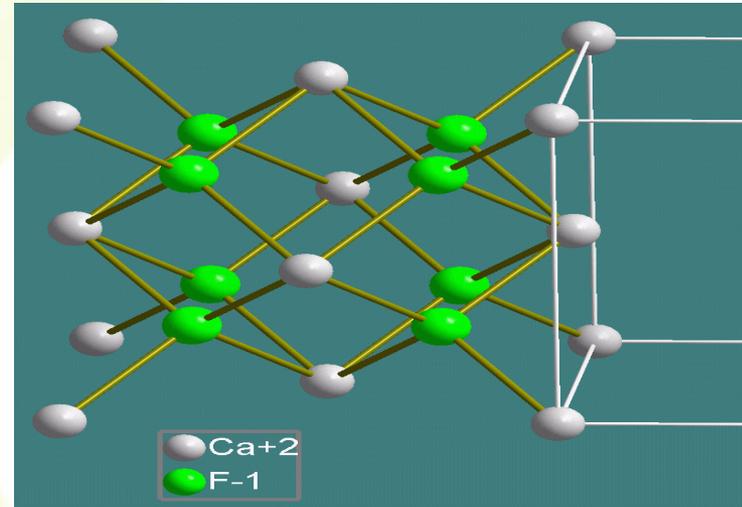
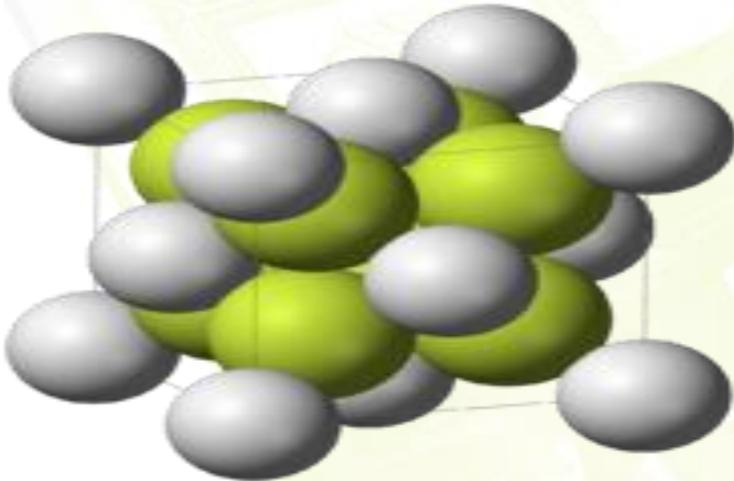
2- Dans un cristal de cuivre, le motif est l'atome de cuivre.

3- Dans un cristal de benzène, le motif est une molécule de benzène (CH).

Dans un cristal de carbonate de calcium, le motif est formé d'un ion calcium et d'un ion carbonate.



Dans un cristal de fluorure de calcium CaF_2 , le motif est formé d'un ion calcium et de deux ions fluorure.



3- 4-2- Maille

Partie élémentaire du cristal, à partir de laquelle on peut reconstituer tout le cristal (par duplication / translation / rotation). La maille élémentaire est la maille de volume minimal.



3- 4-5 Noeuds :

Points régulièrement disposés constituant la structure du cristal.

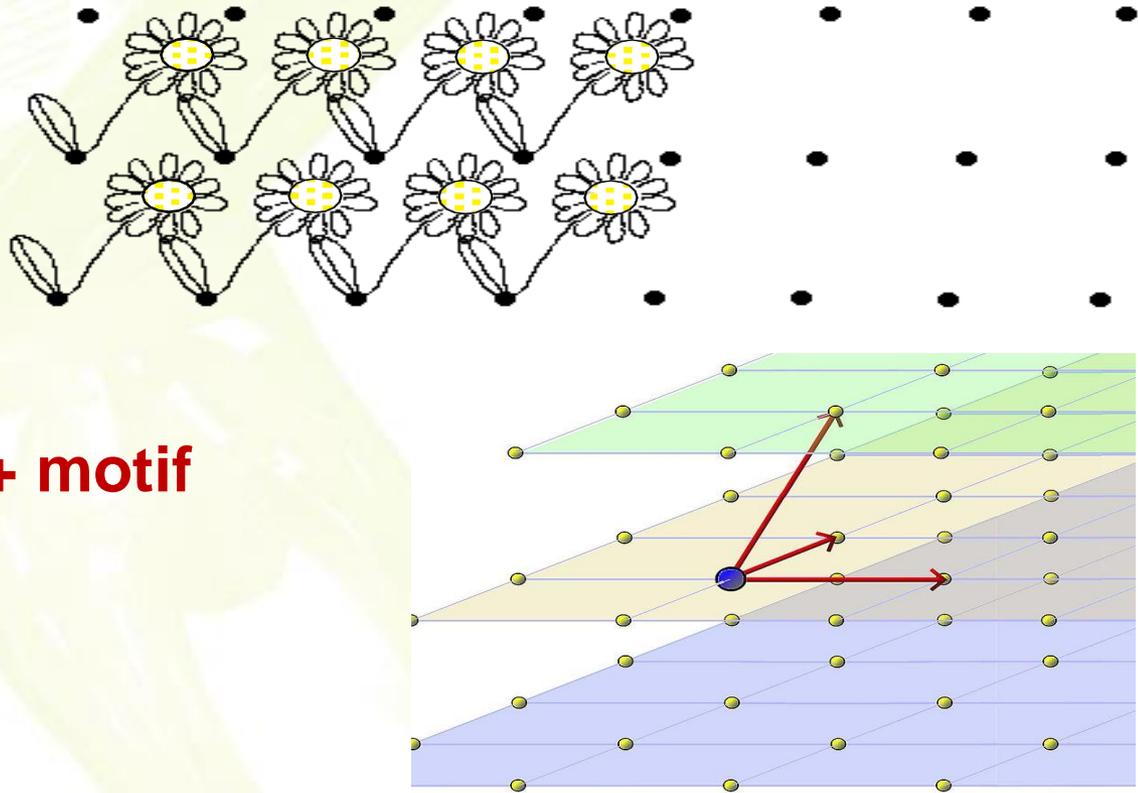
3- 4-6 Population ou multiplicité : Nombre de noeuds à la maille (N).

3- 4- 7- Réseau cristallin : Assemblage infini des mailles (Description géométrique du cristal).

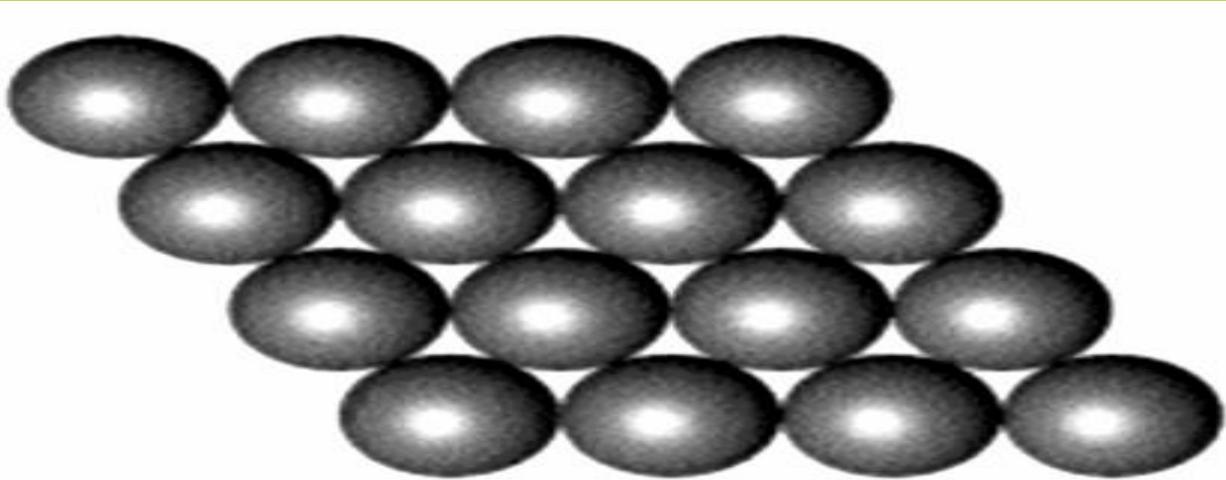
3- 4- 8- Le réseau de BRAVAIS

.En crystallographie, un réseau de Bravais est une distribution régulière de points – appelés nœuds – dans l'espace qui représente la périodicité de la distribution atomique d'un crystal.

Un réseau de Bravais est un ensemble périodique et infini de points, appelés **nœuds**.



Crystal = réseau + motif



BRAVAIS a mis en évidence 7 modes de réseaux, appelés « modes primitifs » ou « modes simples ». **Nous distinguons :**

- 1- le système *cubique* : prisme cubique,
- 2- le système *quadratique* : prisme droit à base carrée,
- 3- le système *orthorhombique* : prisme droit à base rectangle,
- 4- le système *hexagonal* : prisme droit à base losange,
- 5- le système *rhomboédrique* : polyèdre construit sur trois losanges,
- 6- le système *monoclinique* : prisme droit à base parallélogramme,
- 7- le système *triclinique* : parallélépipède quelconque.

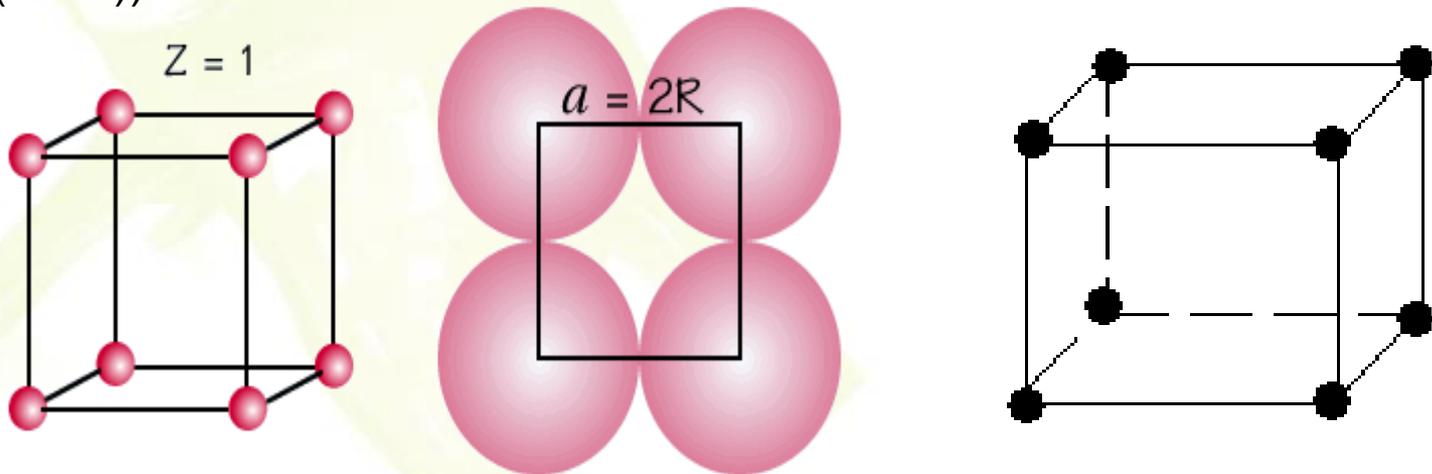


3-5 Réseaux Cristallins Courants

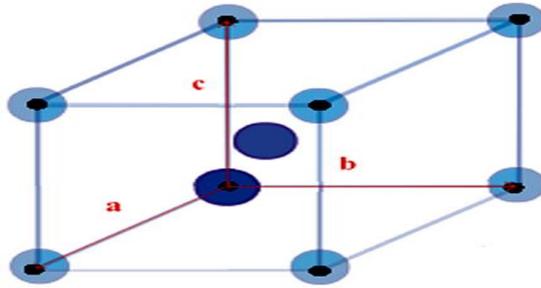
3- 5-1 Cristal Cubique

La plupart des semi-conducteurs cristallisent selon un système cubique. Le système cubique comprend trois réseaux différents possibles, selon la disposition des atomes .

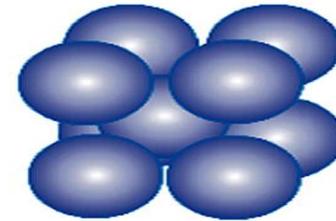
1-Cubique Simple (CS) : les atomes sont aux sommets du cube (figure (II.1.a)).



2- Cubique Centré (CC) : identique au cubique simple mais avec un atome au centre du cube (figure (II.1.b)).

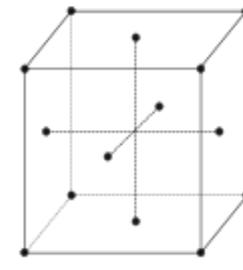
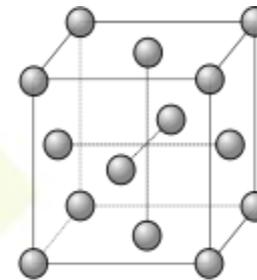
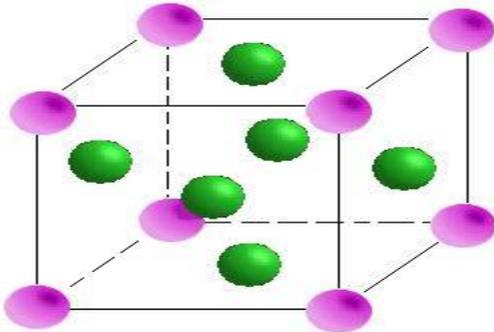


(a)



(b)

3-Cubique Face Centrée (CFC) : identique au cubique simple mais avec un atome au centre de chaque face (figure (II.1.c)).



réseau

motif

Coordinnence

La coordinnence ou nombre de coordination ou indice de coordination d'un atome est le nombre d'atomes voisins les plus proches dans les trois directions de l'espace d'un atome considéré.

Compacité

On appelle compacité d'un empilement le pourcentage de l'espace réellement occupé.

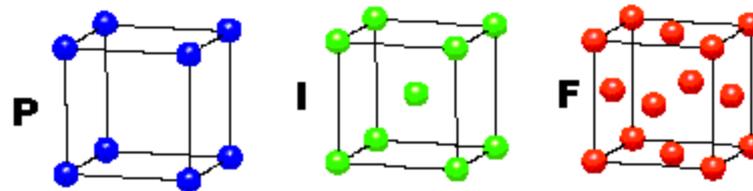
Autre définition de la compacité :

$C = \text{volume occupé par les atomes en propre à la maille} / \text{volume de la maille}$



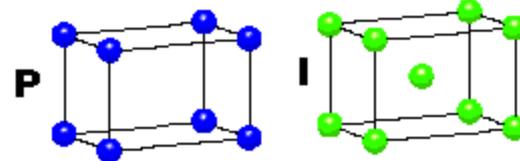
Cubique

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



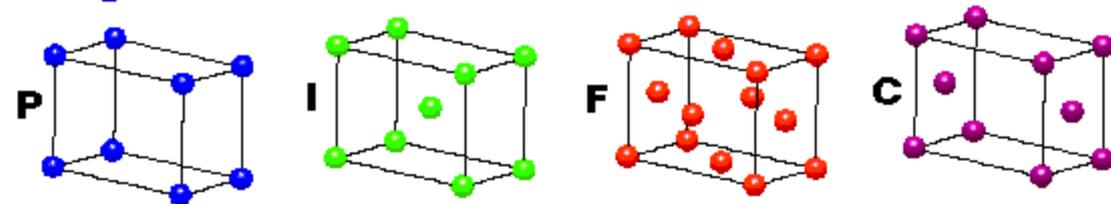
Quadratique

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



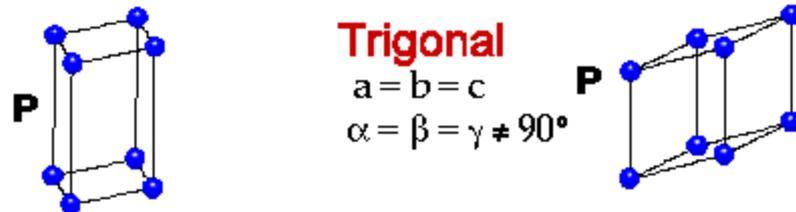
Orthorhombique

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



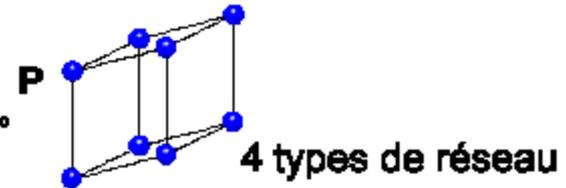
Hexagonal

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



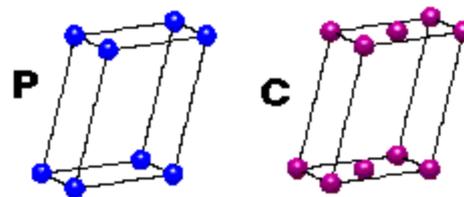
Trigonal

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



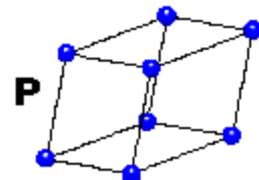
Monoclinique

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



Triclinique

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



4 types de réseau

P Primitif

I centré

F toutes faces centrées

C 1 face centrée

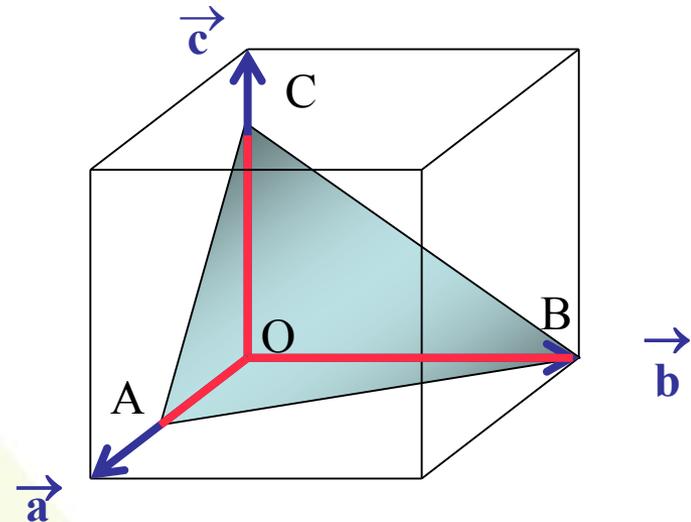
+ 7 systèmes cristallins

= 14 réseaux de BRAVAIS

-Indices de Miller

Soit un plan coupant x en m, y en n et z en p. les indices sont définis - comme étant les plus petits nombres entiers proportionnels à $1/m$, $1/n$ et $1/p$.

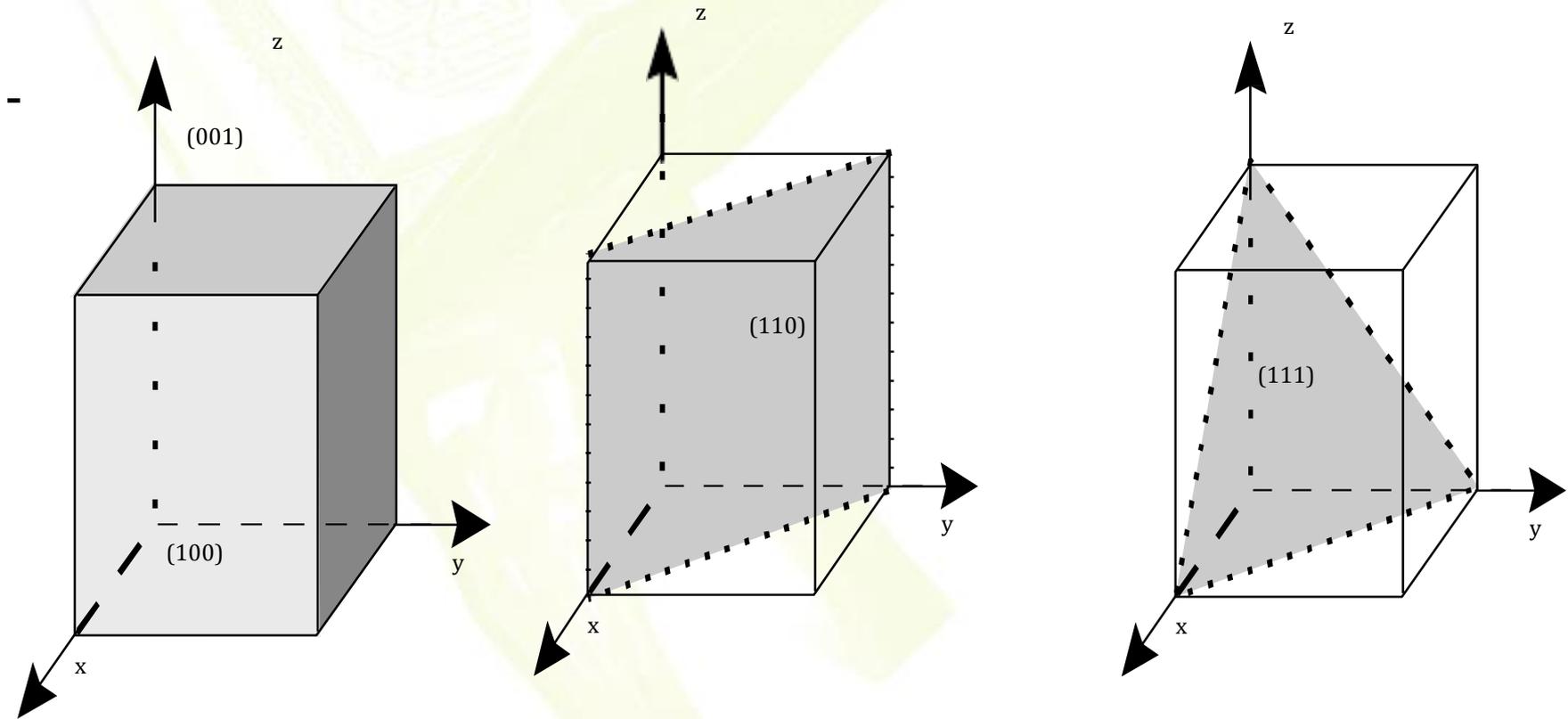
Pour repérer un **plan** on utilise 3 indices h, k, l dits **indices de Miller** :
h correspond à la direction x,
k à la direction y
et l à la direction z.



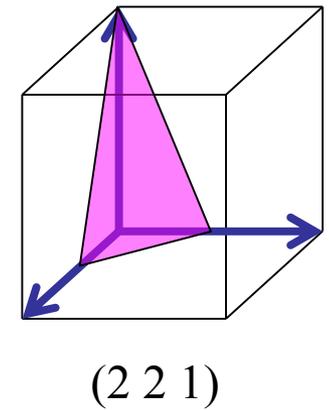
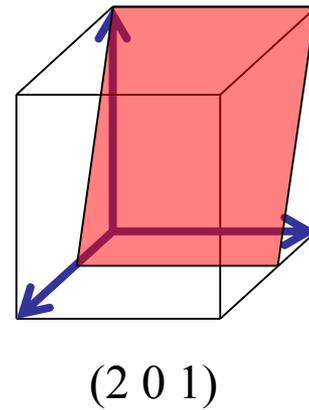
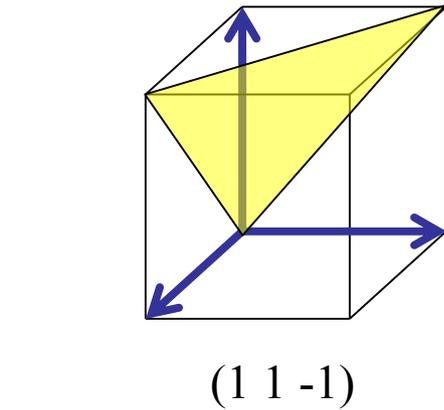
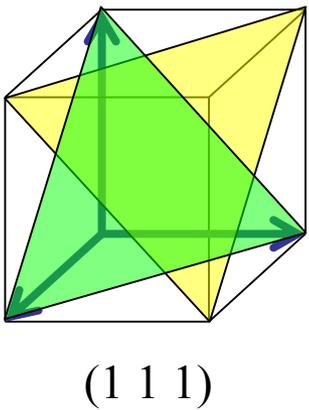
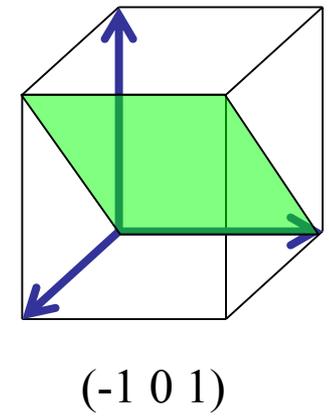
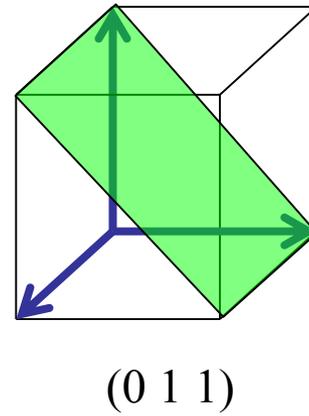
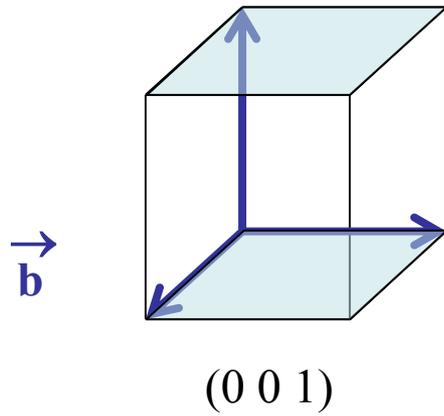
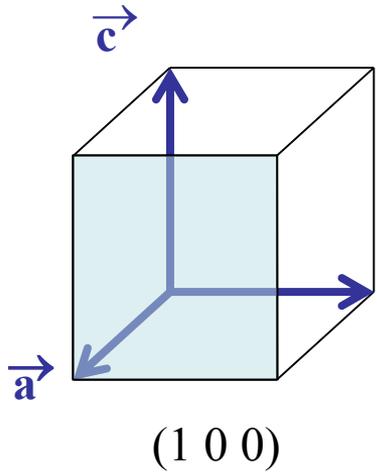
les indices de Miller correspondent aux inverses des : $h = 1/m$, $k = 1/n$
et $l = 1/p$.

Exemple :

La figure représente certains plans cristallographiques repérés par leur indices de Miller (h,k,l) .

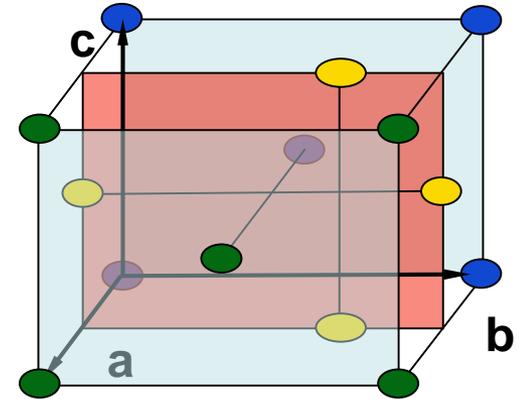


LES PLANS 3D



DISTANCE INTERRETICULAIRE

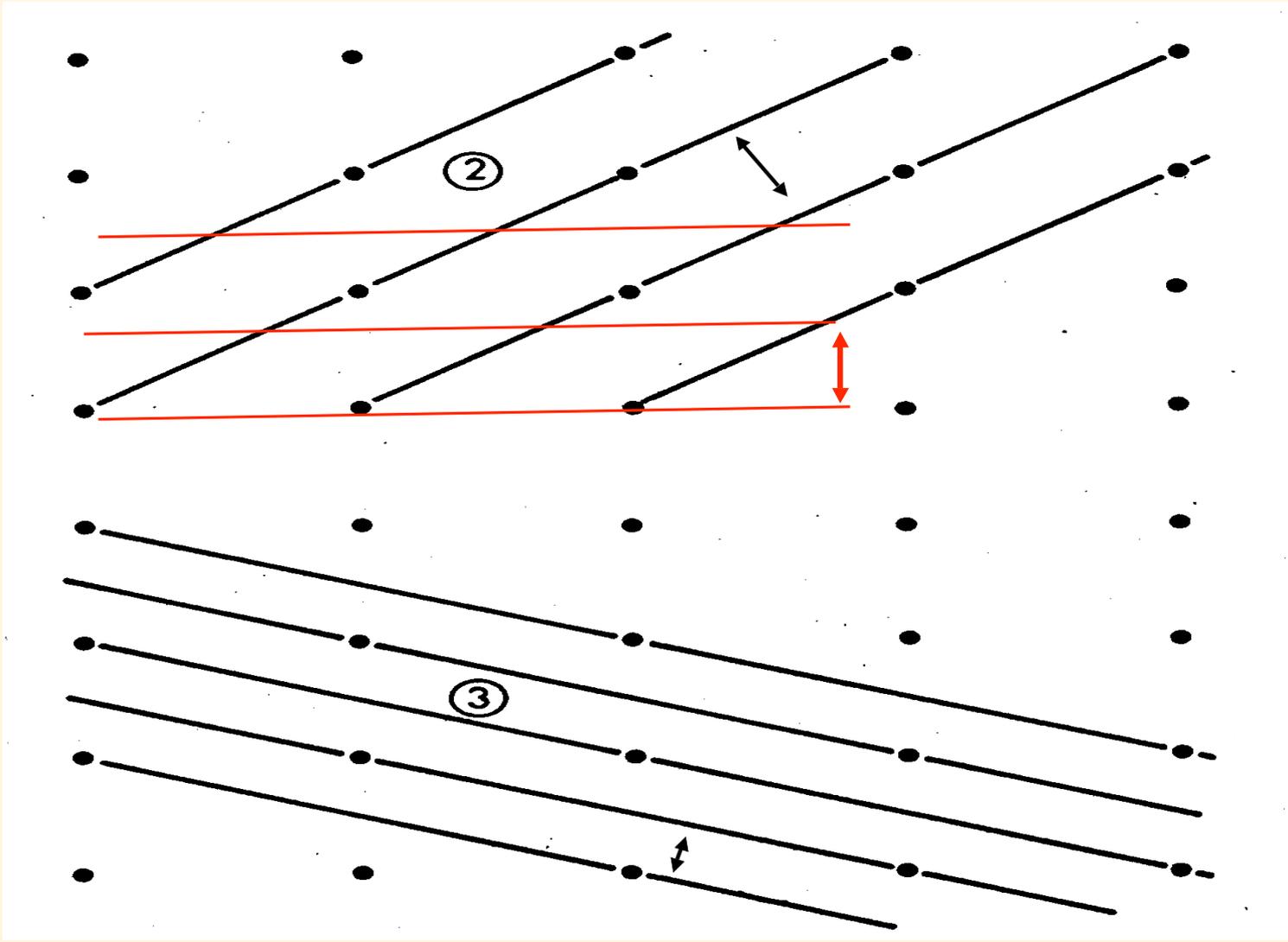
La distance interréticulaire d_{hkl} est la plus courte distance entre deux plans de la famille $\{hkl\}$.



Dans le cas de la famille cristalline cubique, cette formule se réduit à

$$d_{hkl} = \frac{a_0}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

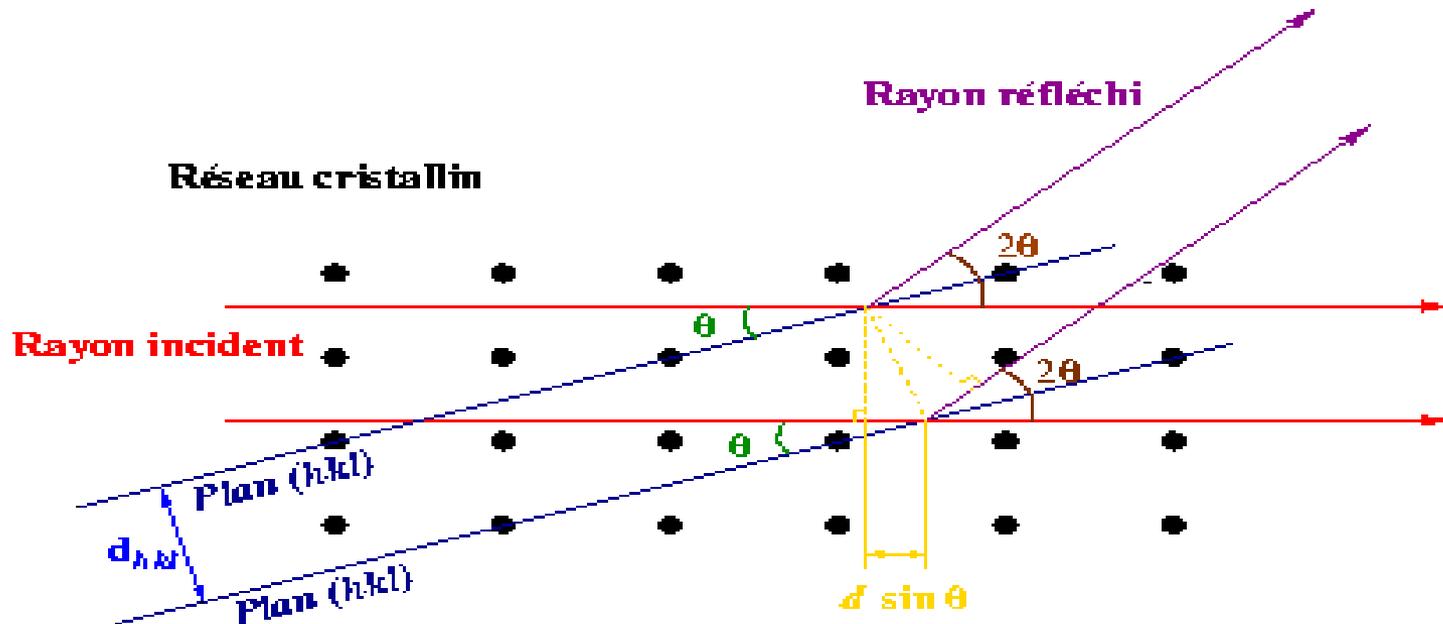
L'ensemble des distances interréticulaires d'un cristal est directement mesurable par diffraction (de rayons X par exemple) grâce à la loi de Bragg.



-loi de Bragg

En physique, la **loi de Bragg** est une loi empirique qui interprète le processus de la diffraction des radiations sur un crystal

Pour cette loi, on considère des plans imaginaires contenant des atomes - et perpendiculaires au vecteur de diffraction h correspond à la direction x ,



-loi de Bragg

Si λ est la longueur d'onde de la radiation et d est la distance interréticulaire du plan cristallin diffractant, alors les directions 2θ du faisceau incident vérifient :

$$2 \cdot d \cdot \sin(\theta) = n \cdot \lambda$$

avec :

d = distance interréticulaire, c'est-à-dire distance entre deux plans cristallographiques ;

θ , angle de Bragg = l'angle entre le faisceau incident et la direction du détecteur) ;

n = ordre de diffraction (nombre entier) ;

λ = longueur d'onde des rayons X.

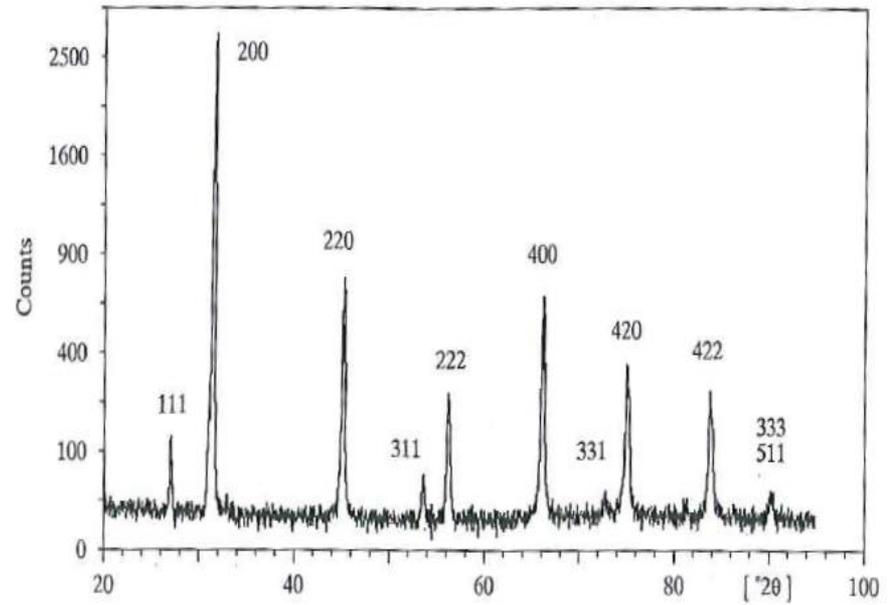


Figure 6-5 Diffraction pattern of NaCl powder. Copper $K\alpha$ radiation, monochromator, variable divergence slit diffractometer. About one-half of the entire range of 2θ is shown here. The vertical axis shows the square root of the number of counts.

Chapitre 2

Semi-conducteurs

2-1- Définition

Les semiconducteurs sont des corps solides dont la **conductivité électrique** se situe entre des métaux et celle des isolants. La *conductivité électrique* des solides est une propriété qui est due à la présence d'électrons libres de se déplacer dans le milieu et de générer ainsi un courant électrique. Le courant électrique est un simple écoulement de ce fluide d'électrons libres.

2-2- Densités de porteurs dans les bandes

On appelle **porteur** une particule mobile pourvue d'une charge électrique.

Un électron de la BC est un **porteur négatif**, un trou de la BV est un

porteur positif.

On peut calculer ensuite le nombre de places disponibles (occupées ou non) par les électrons (dans la BC) et les trous (dans la BV). Cette densité d'états s'obtient par :

1-Pour les électrons (dans la BC) en écrivant :

$$n = N_c * e^{\frac{E_f - E_c}{kT}}$$

2-Pour les trous (dans la BV) en écrivant :

$$p = N_v * e^{\frac{E_v - E_f}{kT}}$$

N_c et **N_v** sont les densités d'états effectives respective des électrons dans la bande de conduction (BC) et des trous dans la bande de valence (BV)



Pour de masse effective m_c et m_v , on a

$$N_{c,v} = 2 \left(\frac{m_{c,v} kT}{2\pi \hbar^2} \right)^{3/2} = \left(\frac{m_{c,v}}{m_0} \right)^{3/2} \left(\frac{T}{300} \right)^{3/2} \times 2.5 \times 10^{19} \text{ (cm}^{-3}\text{)}.$$

E_F est le [niveau de Fermi](#)

KT: l'énergie thermique, produit de la [constante de Boltzmann](#) et de la température.

:



2-4 Semi-conducteur intrinsèque

Un semi-conducteur est dit intrinsèque lorsque le cristal n'est pas pollué par des impuretés pouvant changer la concentration en porteurs libres.

Pour une température différente de 0 K, des électrons peuvent devenir libres c'est à dire passer de la bande de valence à la bande de conduction, où leur concentration est notée n . Ces électrons laissent des trous dans la BV (avec une concentration notée p)

Exemples : Silicium (**Si**), Germanium (**Ge**), Sélénium (**Se**)

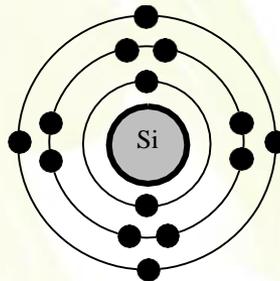


Figure (2-1) : Atome de Silicium

2-3- Loi d'action de masse : $np=n_i^2$

Dans un semi-conducteur intrinsèque, la densité de trous est égale à la densité d'électrons

$$n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

On peut facilement déduire :

$$np = 4 \left(\frac{kT}{2\pi\hbar^2} \right)^3 (m_e^* m_h^*)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) = n_i^2$$

Ainsi que le niveau de Fermi :

$$E_i = E_{Fi} = \frac{E_C + E_V}{2} - \frac{kT}{2} \ln\left(\frac{N_C}{N_V}\right)$$

ou :

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{3kT}{4} \ln\left(\frac{m_v}{m_c}\right)$$



2-3- Loi d'action de masse : $np=n_i^2$

Dans un semi-conducteur intrinsèque, la densité de trous est égale à la densité d'électrons

$$n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}}$$

On peut facilement déduire

$$np = 4 \left(\frac{kT}{2\pi\hbar^2} \right)^3 (m_e^* m_h^*)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right) = n_i^2$$

Ainsi que le niveau de Fermi :

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{3kT}{4} \ln\left(\frac{m_v}{m_c}\right)$$

2-4 Semi-conducteur extrinsèque

Un semi-conducteur extrinsèque est un semi-conducteur intrinsèque dopé par des impuretés adaptées aux applications électroniques (diodes, transistors, etc...) et optoélectroniques (émetteurs et récepteurs de lumière, etc...).

L'introduction de certaines impuretés dans un matériau semi-conducteur permet d'y modifier le nombre de porteurs libres, de choisir le type de conduction (par électrons ou par trous) et de contrôler la conductivité.

Si par exemple on ajoute dans un cristal de silicium **1 atome** de bore pour **10^5** atomes de silicium, on multiplie sa conductivité par **1000**.



2-4 Semiconducteur type n

Les atomes de silicium cristallisent dans une structure où chaque atome est relié à 4 atomes voisins par des liaisons covalentes impliquant 2 électrons pour chaque liaison. Si on introduit un atome ayant 5 électrons de valence (phosphore, arsenic), cet atome prend la place d'un atome du cristal : 4 des électrons de l'impureté participeront aux 4 liaisons avec les 4 atomes voisins du cristal, le 5^{ème} électron restera célibataire.

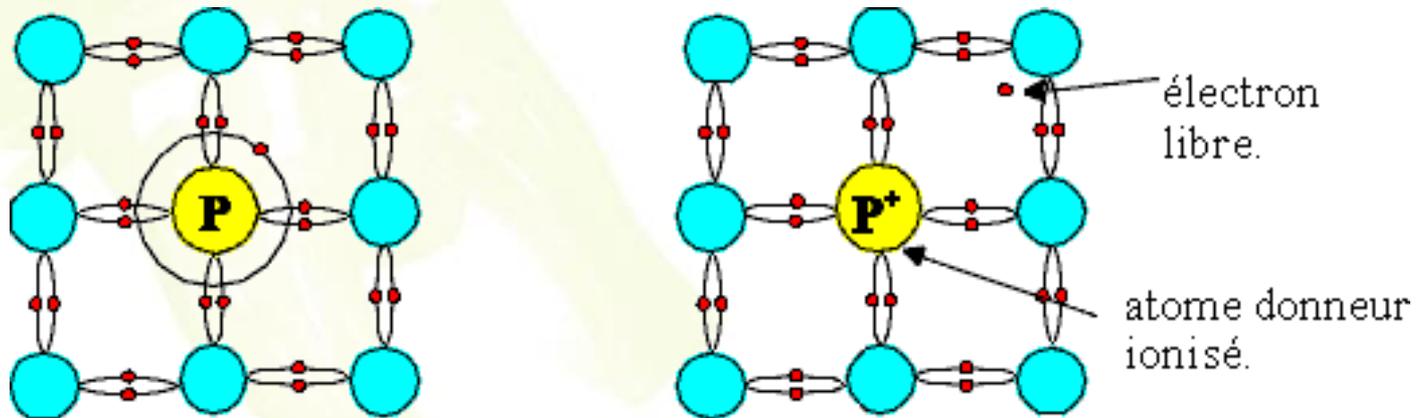


Figure (2-2): semi- conducteur de **type N**

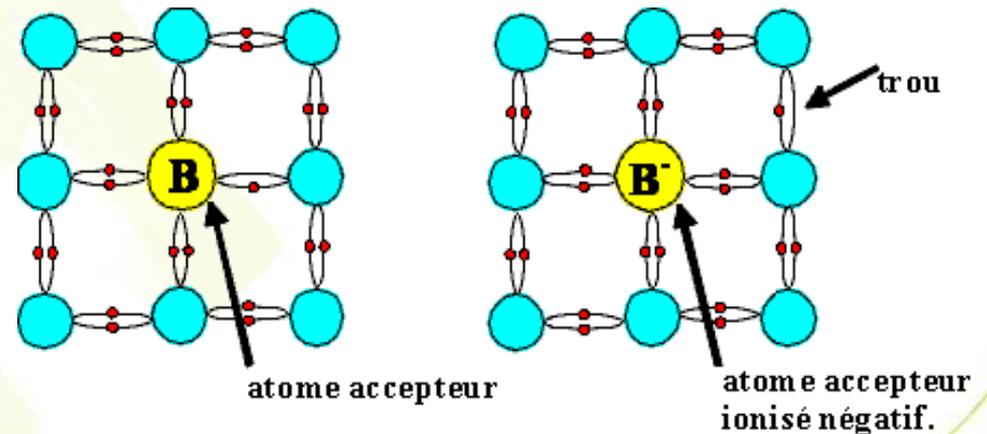
2-4 Semiconducteur type n

A cet atome d'impureté est associé un niveau d'énergie appelé niveau **donneur (Atomes donneurs: N_D)** qui se situe juste en dessous de la bande de conduction. L'écart entre ce niveau et la bande de conduction étant faible, un électron d'un niveau donneur peut facilement passer dans la bande de conduction sous l'action de l'agitation thermique et augmenter la conductivité électrique. A température ambiante, presque toutes les impuretés sont ionisées et la conductivité devient une conductivité de **type n** lorsqu'on augmente le dopage.



2-4 Semiconducteur type P

Si on introduit un atome d'impureté trivalent (Bore, aluminium ou gallium), cet atome ne peut saturer que 3 liaisons sur 4. Il manque donc une liaison par atome d'impureté auquel correspond un niveau d'énergie situé juste au dessus de la bande de valence. Ce niveau est appelé niveau accepteur (**Atomes accepteurs N_A**). Au zéro absolu, ces niveaux accepteurs sont vides. Les niveaux libres de cette dernière engendrent des trous et la conductivité devient de **type p n** lorsqu'on augmente le dopage.



2-5-Densité de porteurs extrinsèques

- nb d'électrons différents du nb de trous

$$n - p = \Delta n \neq 0$$

- Mais loi d'action de masse toujours valable, avec $n.p = cte$

$$n.p = n_i^2 = cste$$

- Pour déterminer ces concentrations (n et p), on écrit la **neutralité électrique** du système.

$$n + N_A = p + N_D \quad \longrightarrow \quad n^2 - (N_D - N_A)n - n_i^2$$