

# CHAPITRE 01

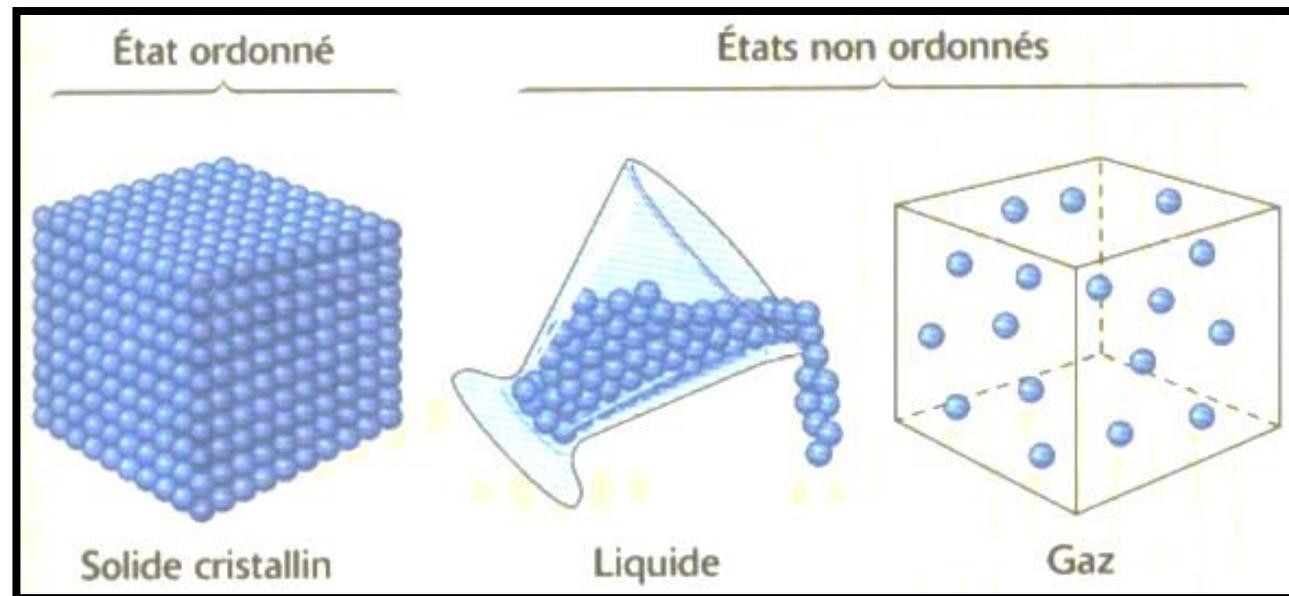
## Structures cristallines parfaites et imparfaites



## 1-Introduction

Tous les **matériaux** sont formés d'**atomes** et de **molécules**. L'**arrangement** et la relation entre eux expliquent certaines de leurs **propriétés**.

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**.



# 1-Introduction

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.

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.

Les **solides** (à l'exception des solides amorphes) ont des structures **ordonnées**. On parle de **solide cristallisé** avec des **maillages périodiques**, des "empilements" réguliers. C'est le domaine de la **cristallographie**.

# 1-Introduction

La **crystallographie** est la branche de la science qui se consacre à l'étude de la **matière cristalline** à l'échelle atomique. Elle s'intéresse essentiellement aux **distributions** spatiales des **atomes** ou groupe d'atomes qui sont étroitement liées aux propriétés physico-chimiques d'un **cristal**.

Nous allons **limiter** notre étude aux **solides cristallins** dont l'organisation sera **parfaitement régulière**. La connaissance d'une partie élémentaire permet alors par répétition périodique tridimensionnelle d'obtenir le cristal parfait.

# 1-Introduction



1895

## Découverte des rayons X

Wilhelm Conrad Röntgen  
(Allemagne, 1845-1923)

Premier prix Nobel de physique  
en 1901

1912

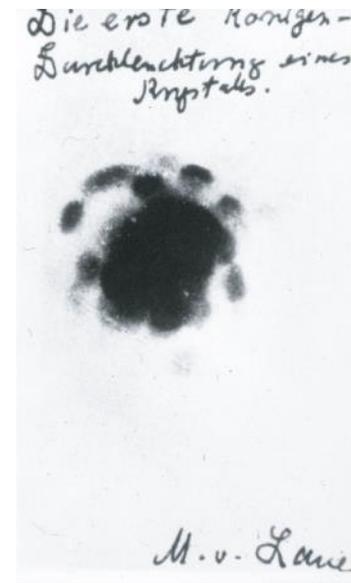
## Découverte de la diffraction des rayons X par les cristaux

Max von Laue

(Allemagne, 1879-1960)

Prix Nobel de physique

1914



# 1-Introduction

1913

Détermination des structures cristallines à l'aide des rayons X.

William Henry Bragg

(Angleterre, 1862-1942) et son fils William Lawrence Bragg (Angleterre, 1890-1971)

Prix Nobel de physique

1915

1937

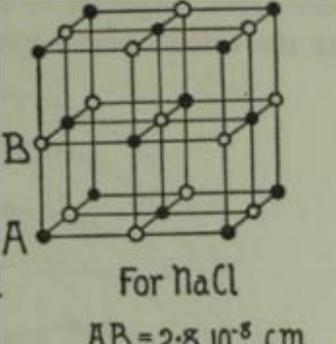
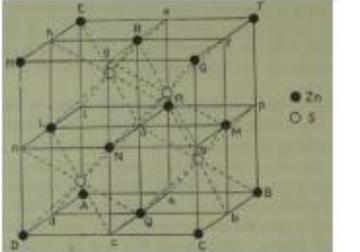
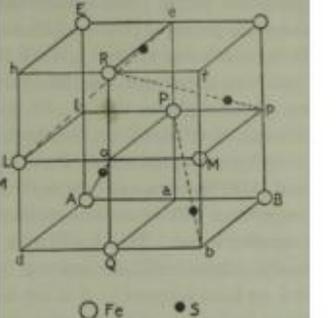
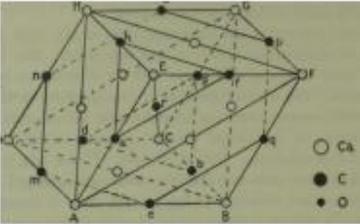
Découverte de la diffraction des électrons par les cristaux.

Clinton Davisson

(Etats-Unis, 1881-1958) et George Paget Thomson (Angleterre, 1892-1975)

Prix Nobel de physique

1937

		
		
<p>W.H Bragg et son spectromètre à RX, et son fils W.L. Bragge</p>	<p>Les différentes représentations des structures cristallines de NaCl, la Blende, la Pyrite et la calcite proposées par W.L. Bragg</p>	

# 1-Introduction

1946

Premières expériences de diffraction neutronique.

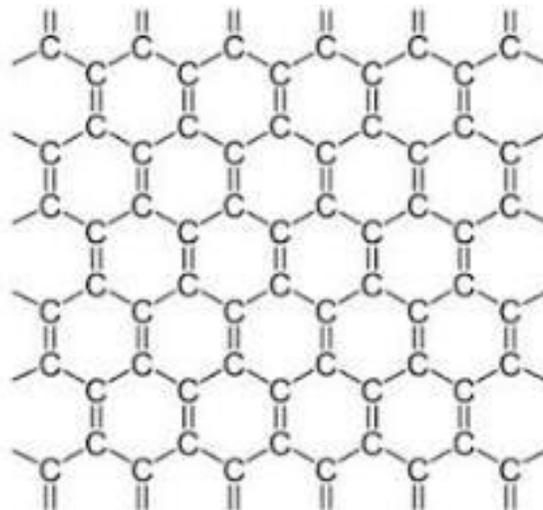
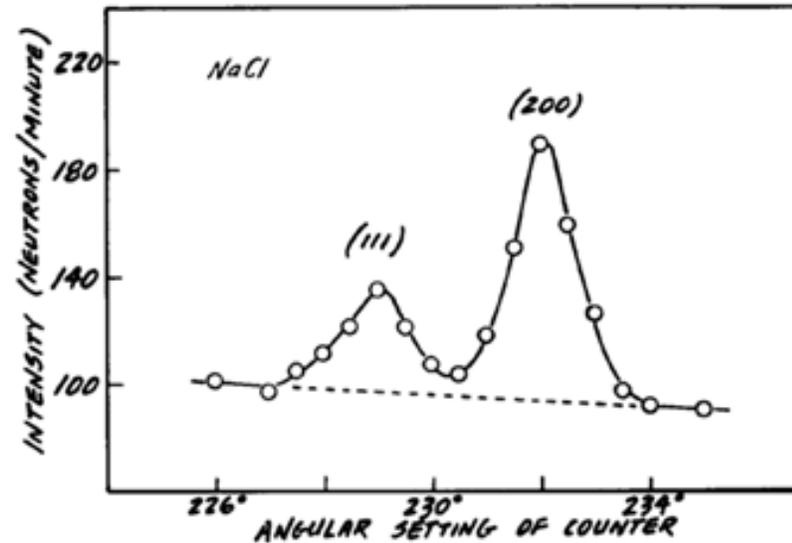
Ernest O. Wollan

(Etats-Unis, 1902-1984) et

Clifford G. Shull

(Etats-Unis, 1915-2001).

Prix Nobel 1994



2004

Découverte du graphène.

Andre Geim

(Pays Bas, 1958) et

Konstantin Novoselov

(Angleterre-Russie, 1974).

Prix Nobel de physique 2010.

## 2-Système cristallin

### 2-1-Le cristal

Depuis les Grecs le mot **cristal** (du latin « **crystallis** » ou du grec « **krastallos** » = **glace**) était utilisé pour désigner une "**Pierre**", le cristal de roche (le **quartz**) qui faisait l'admiration des scientifiques pour sa transparence et sa remarquable et constante forme hexagonale. Ce n'est qu'au cours du temps qu'il fut utilisé pour représenter une classe de corps. La science des cristaux a pris naissance vers **le milieu** du **XVIIe siècle**.



## 2-Système cristallin

### 2-1-Le cristal

Par définition, «un **cristal** est un **composé chimique homogène** avec un **arrangement régulier** et **périodique d'atomes** » comme le sel (NaCl) ou le quartz (SiO<sub>2</sub>)...etc. Les **cristaux** ne sont **pas limités aux minéraux**: ils comprennent la plupart des matières solides telles que le sucre, la cellulose, les métaux, les os...etc.

Les **cristaux** sont **naturellement présents** sur terre sous forme de grandes roches cristallines, telles que le quartz, le granit. Les cristaux sont **également formés** par des **organismes vivants**. Par exemple, la calcite est produite par les mollusques.

## 2-Système cristallin

### 2-1-Le cristal

Un **cristal** est un **solide polyédrique**, ayant des **faces planes** qui se rencontrent le long **d'arrêtes droites**. Il a une **structure régulière** et **périodique**, formée d'un ensemble ordonné d'un grand nombre d'atomes, de molécules ou d'ions.

Les **cristaux** sont des solides qui sont constitués par des **édifices réguliers** d'**atomes**, d'**ions** ou de **molécules**, **liés** entre eux par les différents types de **liaisons chimiques**. Ces liaisons peuvent être **très faibles** (le cristal d'argon) ou **très forte** (cristal de carbone sous forme diamant).

Un cristal de  $1\text{cm}^3$  est pratiquement infini : il contient de l'ordre de  $10^{23}$  atomes.

## 2-Système cristallin

### 2-1-Le cristal

Dans le cristal parfait ou idéal, à l'échelle de l'atome, l'arrangement régulier des atomes s'étend pratiquement à l'infini. Un monocristal de silicium utilisé dans la fabrication des circuits intégrés atteint une longueur de 1 à 2 m pour un diamètre de 0,2 m.



## 2-Système cristallin

### 2-1-Le cristal

Les matériaux cristallins existent sous une forme **monocristalline** ou **polycristalline**:

Le mot «**mono**» signifie **un**. Donc, le mot monocristallin signifie un monocristal. Les solides monocristallins sont composés d'un réseau monocristallin, par conséquent, ils ont **un ordre à longue distance**. Il n'y a donc **pas de limites de grains**. Cette uniformité leur confère des propriétés mécaniques, optiques et électriques uniques.

Ils sont utilisés dans des **applications très performantes**. En outre, leur résistance est très élevée, donc utilisée pour produire un matériau à haute résistance.

## 2-Système cristallin

### 2-1-Le cristal

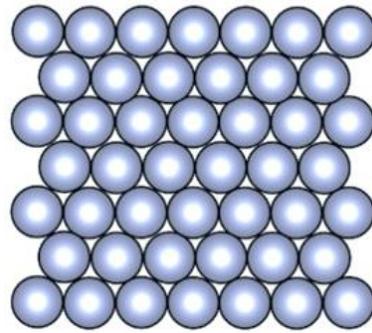
Les **polycristallins** sont des solides composés de nombreux nombres de **petits cristaux**. Ils sont **disposés** dans des **orientations différentes** et liés par des limites très défectueuses.

Dans une structure comme celle-ci, **les monocristaux** sont maintenus ensemble par une **couche de solides amorphes**. Un solide amorphe est un solide qui n'a pas de structure cristalline. Autrement dit, il n'a pas d'arrangement ordonné à longue portée d'atomes, de molécules ou d'ions dans la structure.

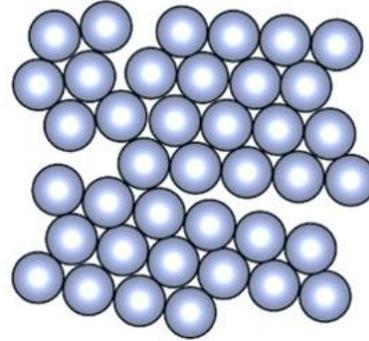
Par exemple, tous les métaux et céramiques sont polycristallins. Dans ceux-ci, l'ordre et l'orientation sont très aléatoires.

## 2-Système cristallin

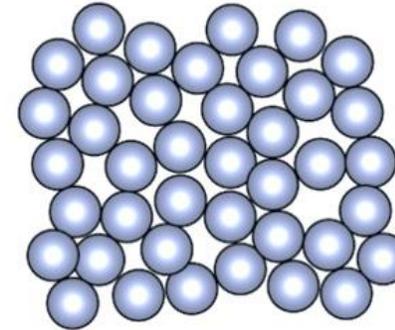
### 2-1-Le cristal



**Monocristallin**



**Polycristallin**

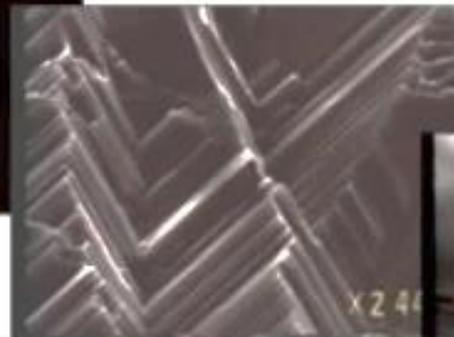


**Amorphe**

Céramique en alumine d'une bougie de voiture



Bougie de  
voiture  
(10 cm)



Surface de rupture  
(1  $\mu\text{m}$ )

Grains fins  
de  $\text{Al}_2\text{O}_3$   
(0.1  $\mu\text{m}$ )



Echelle atomique  
(0.1 nm)



## 2-Système cristallin

### 2-1-Le cristal

Il existe différents **types de cristaux**, que l'on classe d'après la nature de la liaison chimique assurant leur cohésion : **métalliques** (Fer), **ioniques** (Chlorure de sodium), **covalents** (Carbone), **moléculaires** (eau).

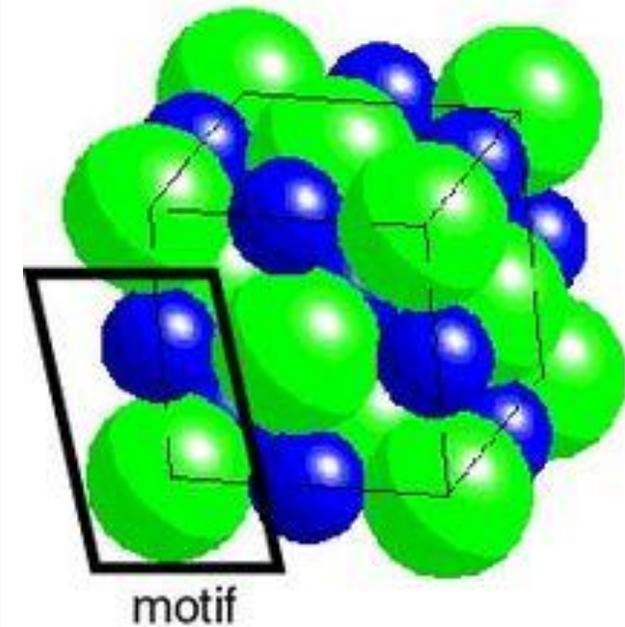
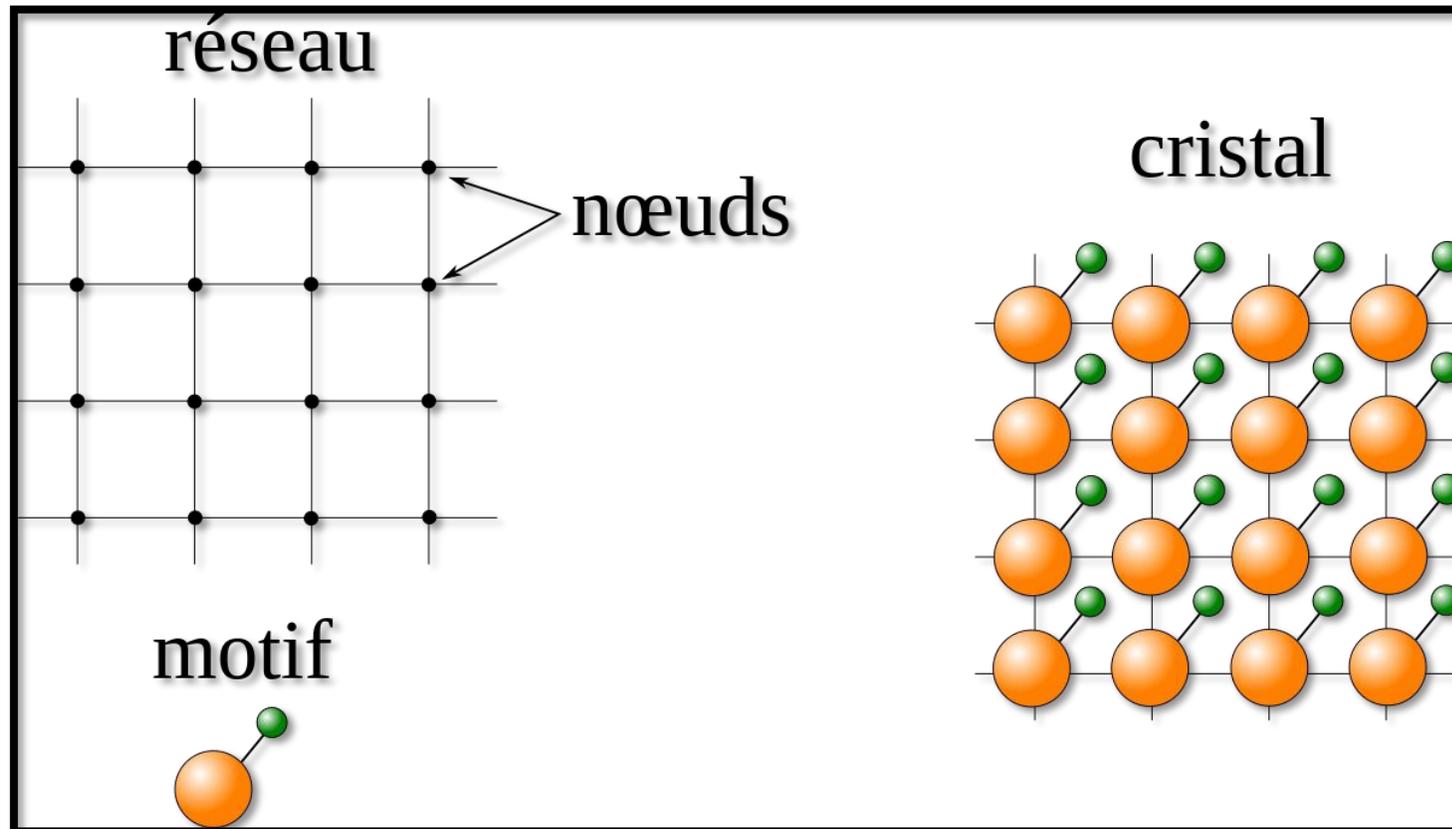
Ces divers cristaux sont décrits de la même façon : Un ensemble de particules (atomes, ions ou molécules) réparties régulièrement dans l'espace, appelé **motif**. Ce motif se situe en des points équivalents de l'espace appelés **nœuds**. L'ensemble de ces nœuds constitue le **réseau** dont l'unité est une structure parallélépipédique nommée **maille**.

**CRISTAL = RESEAU+MOTIF**

## 2-Système cristallin

### 2-1-Le cristal

**CRISTAL = RESEAU+MOTIF**



## 2-Système cristallin

### 2-2-Vecteur de translation périodique

La **régularité** d'un cristal est valable dans **toutes les directions** : cela implique que quelle que soit la direction choisie dans le cristal, les groupes atomiques se succéderont périodiquement. On a ainsi **des translations périodiques** dans toutes les directions.

L'espace ayant **3 dimensions**, on peut choisir une base de trois vecteurs  $\{a, b, c\}$ , vecteurs qui sont **les périodes de translation** minimales dans trois directions non coplanaires.

À partir d'un nœud « O » du réseau et de trois vecteurs de base  $\{a, b, c\}$ , on peut engendrer le réseau.

## 2-Système cristallin

### 2-2-Vecteur de translation périodique

Tout point « M » (c'est-à-dire tout nœud du réseau) est défini par l'équation:

$$\overrightarrow{OM} = x\vec{a} + y\vec{b} + z\vec{c}; \quad x, y, z \text{ des entiers arbitraires}$$

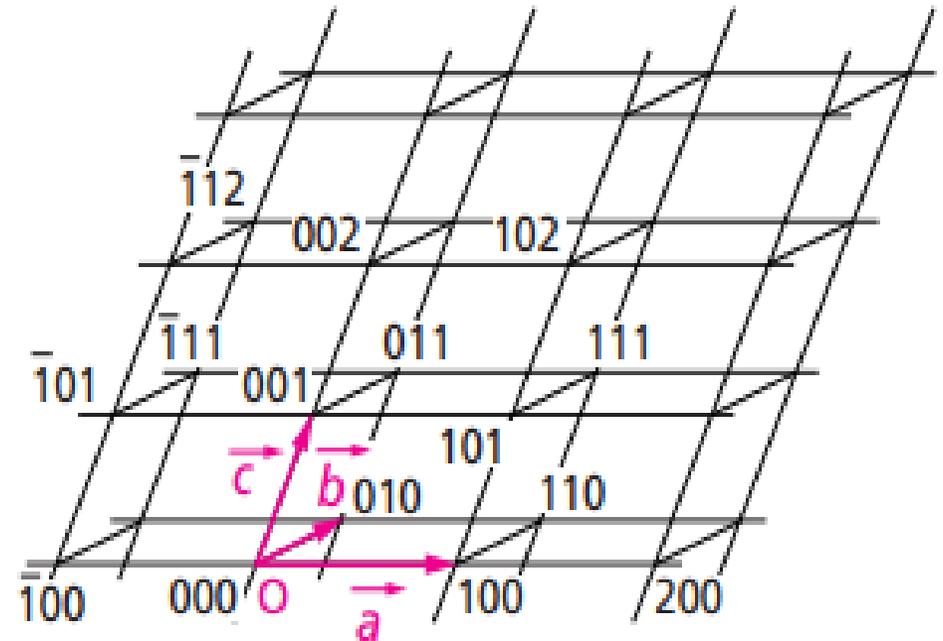
Les trois vecteurs  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  et  $\vec{c}$  sont appelés vecteurs fondamentaux. Le parallélépipède construit sur ces trois vecteurs est appelé maille fondamentale. Les longueurs a, b et c des côtés de ce parallélépipède sont les paramètres de maille.

## 2-Système cristallin

### 2-3-Le réseau

On obtient le réseau d'un cristal en faisant abstraction de la matière (atomes, ions...). Le réseau peut être considéré comme l'ensemble des vecteurs de translation  $\overrightarrow{OM}$ .

Les points géométriques ont pour coordonnées :  $x, y, z$ . Ce sont des entières (en excluant pour l'instant le cas des mailles dites multiples), puisqu'on atteint tout nœud à partir de l'origine en ajoutant vectoriellement des nombres entiers de  $\vec{a}$ , de  $\vec{b}$  et de  $\vec{c}$ .



## 2-Système cristallin

### 2-4-La maille

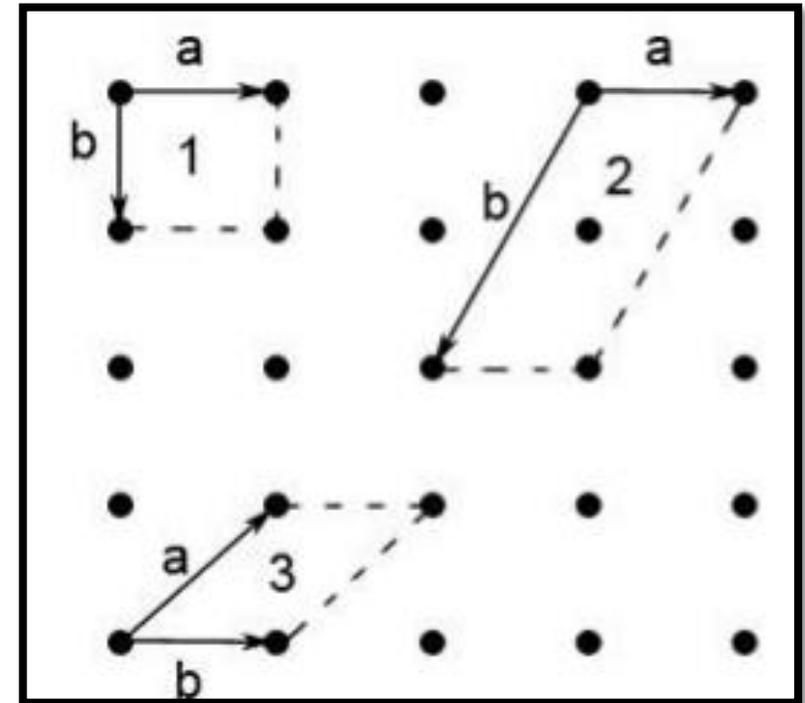
La maille est le plus petit parallélogramme représentatif. Il existe différents **types de cristaux**, que l'on classe d'après la nature de la liaison chimique assurant leur cohésion : **métalliques** (Fer), **ioniques** (Chlorure de sodium), **covalents** (Carbone), **moléculaires** (eau).

La maille est le plus petit parallélogramme représentatif. **Les vecteurs fondamentaux**  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  et  $\vec{c}$  doivent être **parallèles aux systèmes** du réseau.

Comme exemple, dans un état plan ;

\*La bonne maille est la N° 1.

\*La maille N°3 est moins bonne.



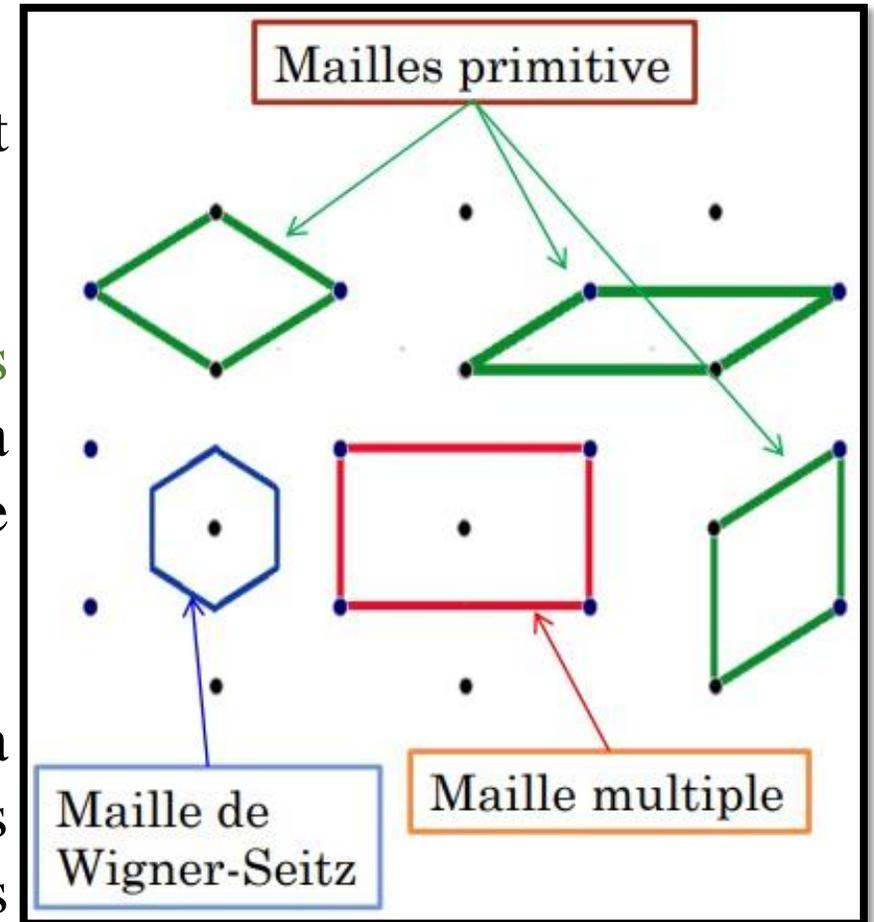
## 2-Système cristallin

### 2-4-La maille

On distingue deux types de mailles, simple et multiple :

a- Une maille simple contient seulement des **nœuds** aux **sommets** de la maille. Si la maille construite n'a **aucun nœud à l'intérieur** ou sur les **faces** ou encore sur les **arêtes**, elle est dite primitive ou simple.

À trois dimensions, une maille primitive a 8 nœuds aux 8 sommets du parallélépipède, mais chacun d'eux se partage avec 7 autres mailles adjacentes



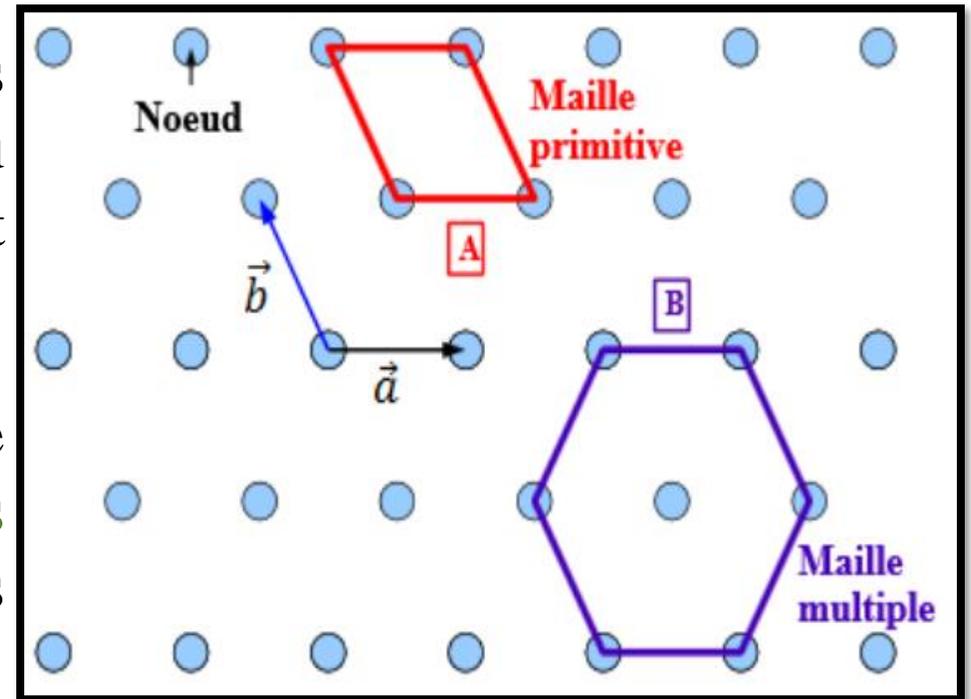
## 2-Système cristallin

### 2-4-La maille

b- Une maille multiple en contient **plus** des nœuds aux sommets des nœuds soit au **centre** du volume, soit aux centres de toutes les **faces** soit aux centres de **deux faces** opposées.

Les coordonnées des **nœuds** du réseau ne sont alors pas toutes **entières** : les **nœuds supplémentaires** dans la maille multiple ont des coordonnées **fractionnaires**.

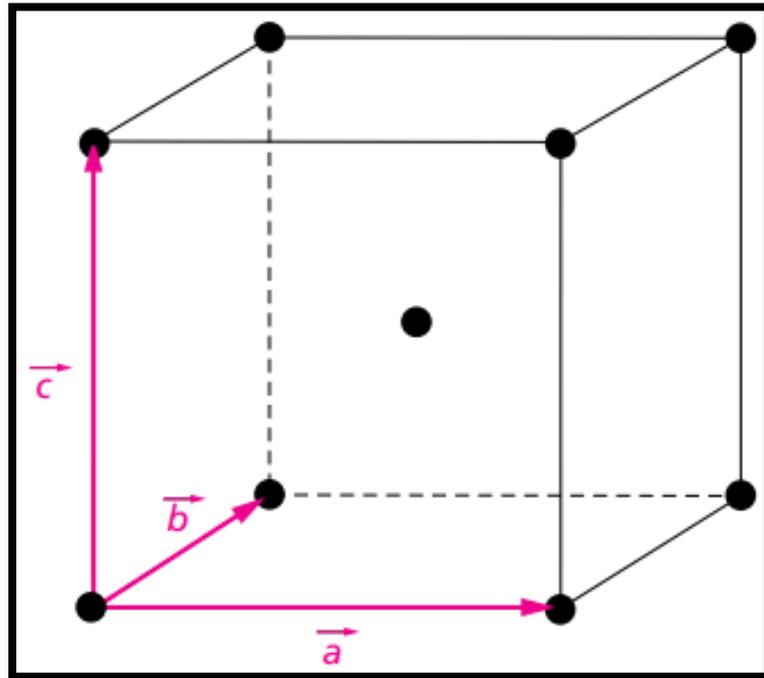
Des coordonnées fractionnaires se retrouvent sur d'autres nœuds dans tout le réseau, puisque les nœuds supplémentaires sont répétés par toutes les translations du réseau.



## 2-Système cristallin

### 2-4-La maille

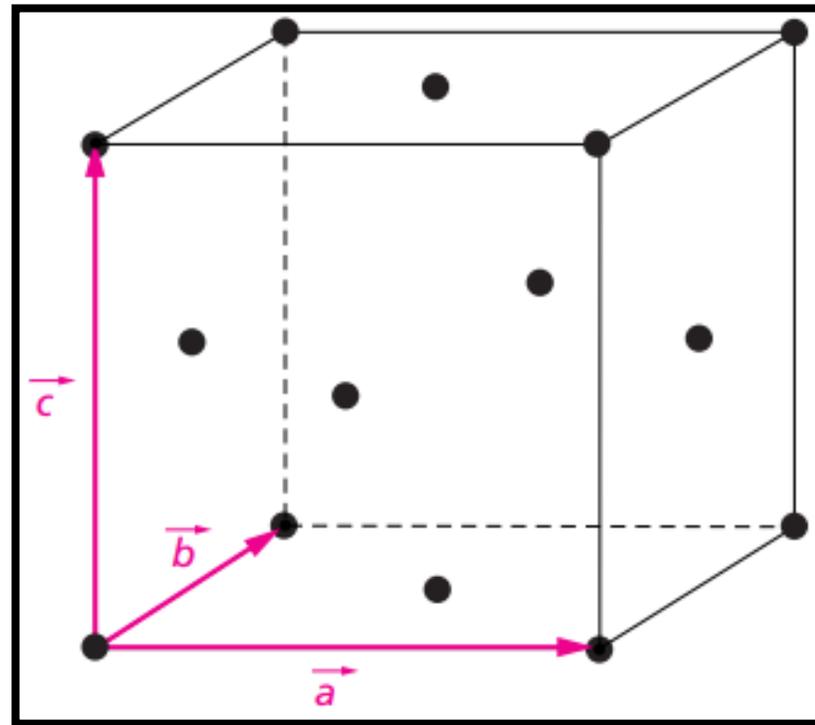
b- Le tungstène est cubique centré. Cela signifie que son réseau appartient au système cubique, et qu'on a pris une maille multiple : elle est cubique, avec un nœud supplémentaire au centre de la maille, de coordonnées  $\frac{1}{2} \frac{1}{2} \frac{1}{2}$



## 2-Système cristallin

### 2-4-La maille

b- Un cristal de cuivre une maille cubique faces centrées, c'est-à-dire une maille multiple qui comporte des nœuds au centre de chacune des faces . Elle a en propre trois nœuds supplémentaires.



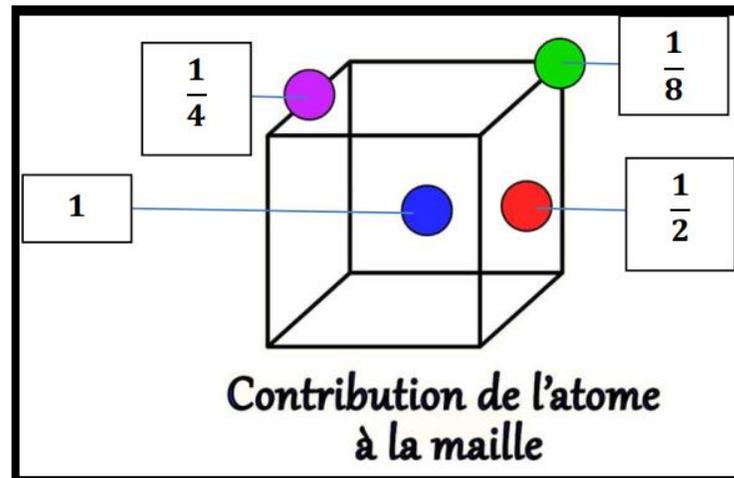
## 2-Système cristallin

### 2-4-La maille

#### 2-4-1-La multiplicité « Z »

Elle représente le nombre de motif (atomes, ions, etc) qui contient une maille.  
C'est la population d'une maille.

- Sur un sommet, l'atome appartient à 8 mailles et compte pour  $\frac{1}{8}$ .
- Sur une arête, l'atome appartient à 4 mailles et compte pour  $\frac{1}{4}$ .
- Sur une face, l'atome appartient à 2 mailles et compte pour  $\frac{1}{2}$ .
- À l'intérieur de la maille l'atome appartient à 1 maille et compte pour 1.

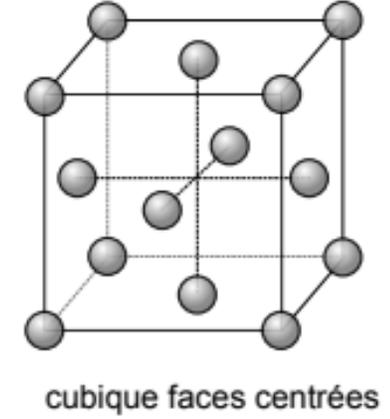
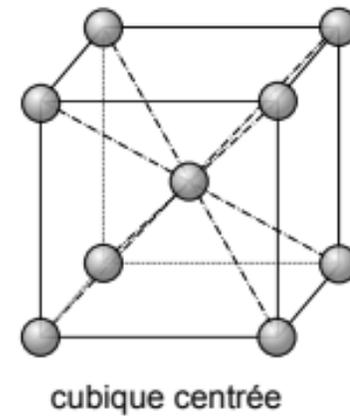
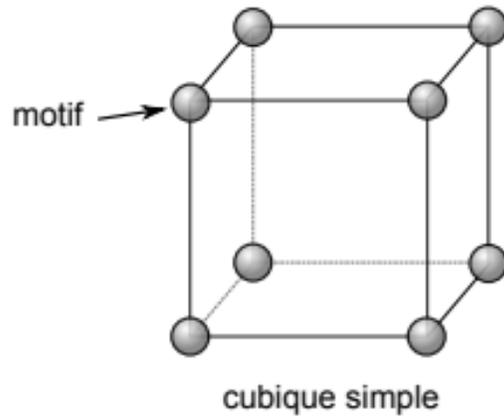


## 2-Système cristallin

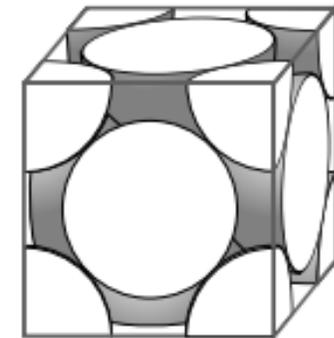
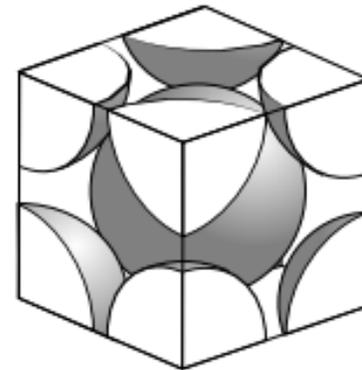
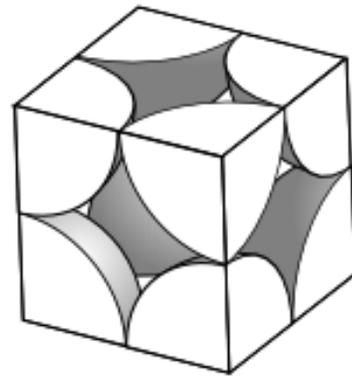
### 2-4-La maille

#### 2-4-1-La multiplicité Z

représentation éclatée :



représentation compacte :



## 2-Système cristallin

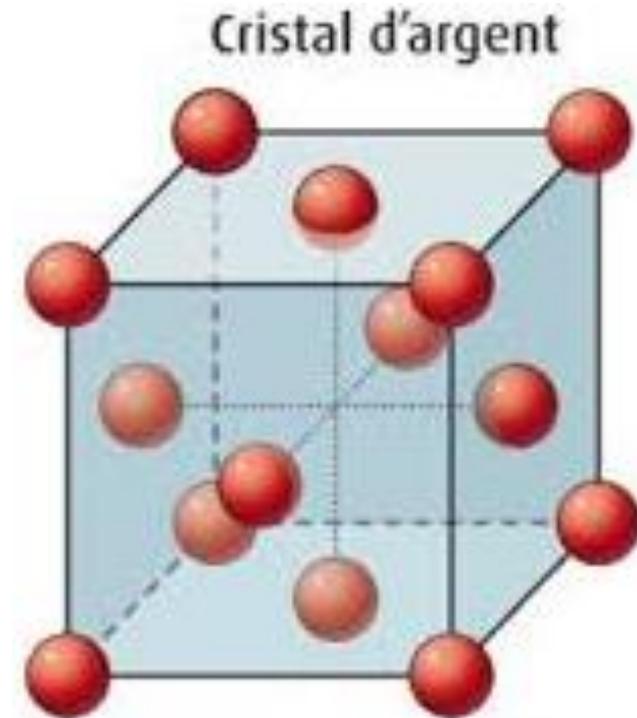
### 2-4-La maille

#### 2-4-1-La multiplicité Z

#### Exemple:

Quelle est la population de la maille représentée?

$$Z = 6 \times 1/2 + 8 \times 1/8 = 4.$$



## 2-Système cristallin

### 2-4-La maille

#### 2-4-2-La masse volumique « $\rho$ »

C'est le rapport de la masse de la maille divisé par le volume de la maille.  
Dans le cas d'une maille cubique contenant un seul type de motifs :

$$\rho = \frac{\text{Masse de la maille}}{\text{Volume de la maille}} = \frac{Z \times \text{Masse de l'atome}}{\text{Volume de la maille}}$$

## 2-Système cristallin

### 2-4-La maille

#### 2-4-2-La masse volumique « $\rho$ »

Exemple: Donner l'expression de la masse volumique «  $\rho$  » pour une maille CFC d'atomes de fer, en fonction de «  $a$ ,  $N_A$  et  $m_{Fe}$  ». La masse volumique du fer «  $\gamma$  » (de type CFC) est de  $8,21 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ .

En déduire la valeur du paramètre de maille «  $a$  ». On donne  $m_{Fe} = 56 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$  et  $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ .

$$\rho = \frac{Z \times M_{Fe}}{a^3}$$

La masse d'un atome unique de fer vaut :  $m_{Fe} / N_A = 9,30 \times 10^{-23} \text{ g}$ . Dans un système CFC, la multiplicité  $Z=4$  donc;

$$a^3 = \frac{Z \times M_{Fe}}{\rho} = \frac{4 \times 9,30 \times 10^{-23}}{8,21 \times 10^6} = 4,53 \times 10^{-29} \Rightarrow a = 3,56 \text{ \AA}$$

## 2-Système cristallin

### 2-4-La maille

#### 2-4-3-La compacité « C »

Si on observe 3 mailles issues de 3 cristaux ayant des structures cristallines différentes. On se rend compte qu'il y a plus ou moins d'espace libre c'est-à-dire de vide entre les motifs dans la maille en fonction de la structure considérée. Le taux d'occupation de la maille par les motifs (atomes, ions, etc) est dit compacité.

$$C = \frac{\textit{Volume occupé par les atomes}}{\textit{Volume de la maille}} = \frac{Z \times \textit{Volume de l'atome}}{\textit{Volume de la maille}}$$

\*La compacité est une grandeur sans unité. Sa valeur est comprise entre 0 et 1.

## 2-Système cristallin

### 2-4-La maille

#### 2-4-3-La compacité « C »

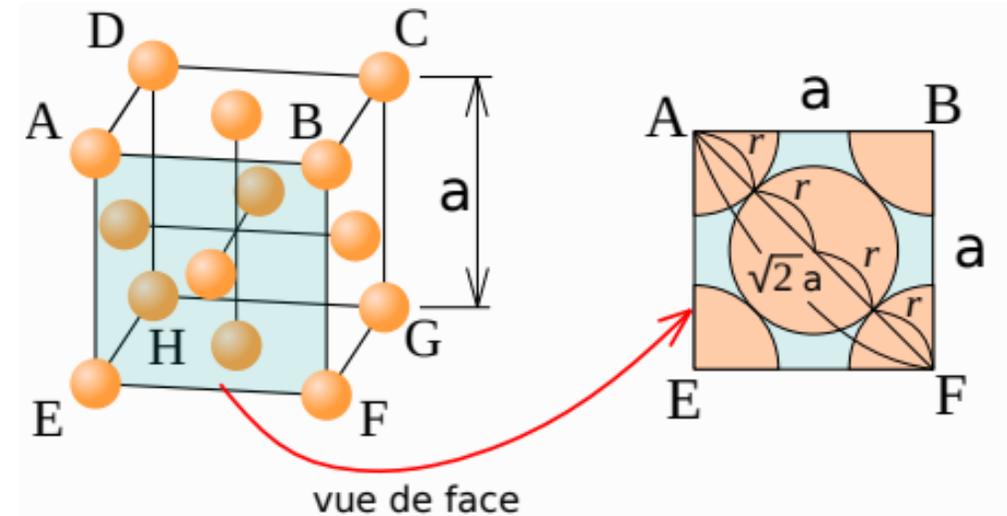
Pour évaluer la compacité, on considère que le motif (atome ou ion) est une sphère de rayon « r ». En considérant les atomes sphériques et tangents selon une diagonale à la face ceci permet l'expression de « r » en fonction de « a ».

Sur une maille CFC

$$a\sqrt{2} = 4r, \text{ donc } r = \frac{\sqrt{2}}{4} a$$

$$C = \frac{Z \times V_{\text{atome}}}{V_{\text{maille}}} = \frac{Z \times \frac{4\pi r^3}{3}}{a^3} = \frac{\sqrt{2}}{6} \pi$$

$$C = 0,74$$

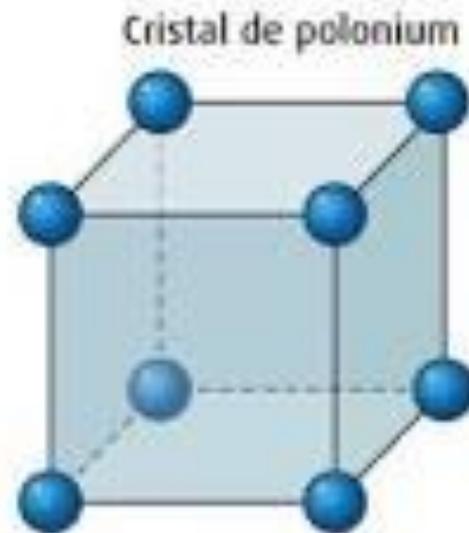


## 2-Système cristallin

### 2-4-La maille

#### 2-4-4-Exercice 1

\*Sachant que  $M_{\text{polonium}} = 209 \text{ g/mol}$  et le rayon atomique «  $r$  » = 0,168nm. Calculez la multiplicité de la maille du cristal de polonium (Forme cubique simple), la masse volumique et la compacité de la maille.



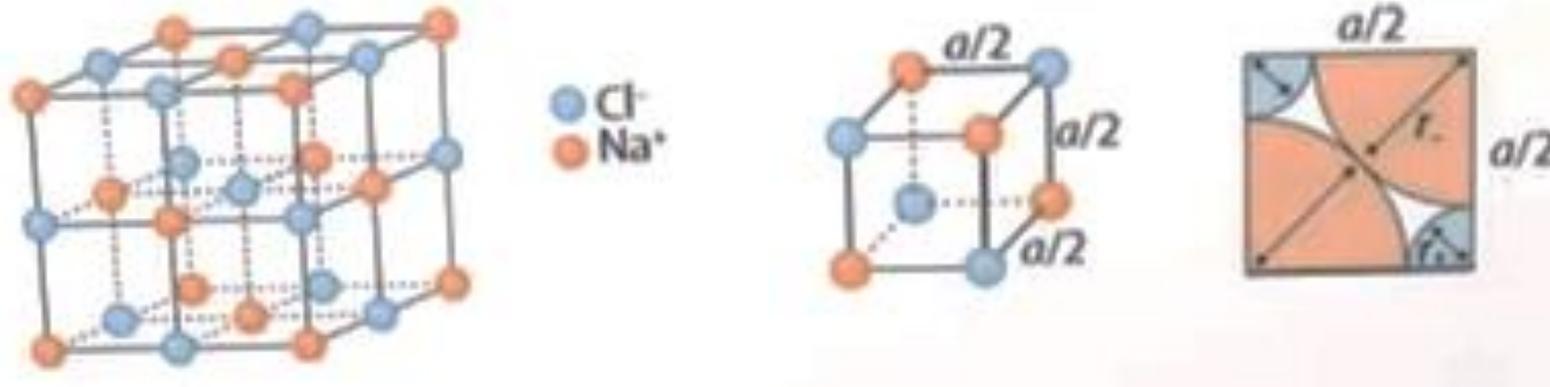
## 2-Système cristallin

### 2-4-La maille

#### 2-4-4-Exercice 2

En utilisant le schéma de droite établissez la relation entre l'arête «  $a$  » et le rayon d'ion chlorure «  $r^-$  » et déduisez sa valeur.  $a = 5,64 \times 10^{-10}$  m.

Déterminez la population et le volume des ions ainsi que la compacité de l' $1/8^e$  de la maille représentée sur la figure au milieu.  $r^+ = 8,26 \times 10^{-11}$  m

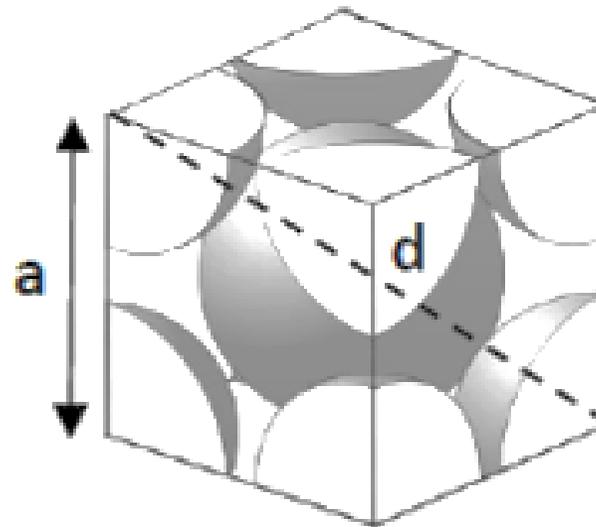


## 2-Système cristallin

### 2-4-La maille

#### 2-4-4-Exercice 3

Calculez la compacité du fer «  $\alpha$  » sachant que les atomes sont sphériques et tangents selon la diagonale intérieure nommée «  $d$  » de la maille CS.



## 2-Système cristallin

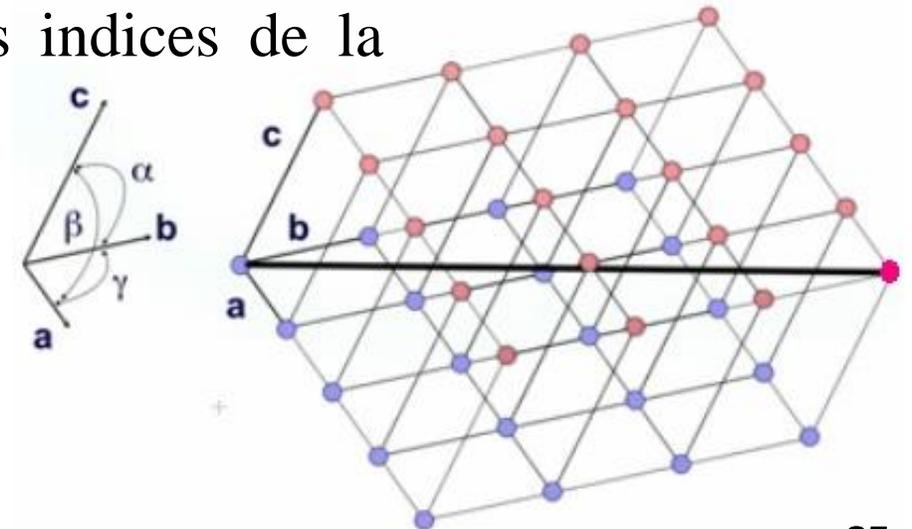
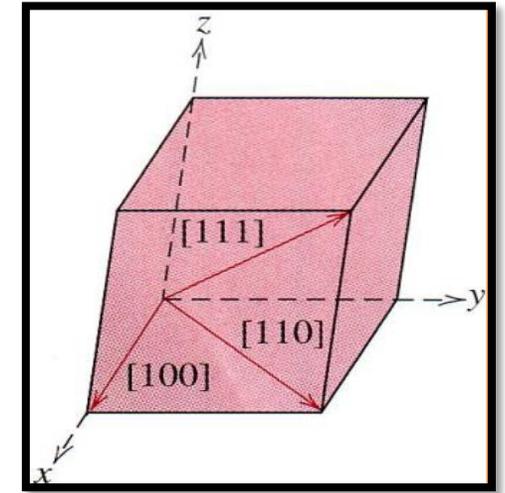
### 2-5-Rangées et Plans réticulaires

#### 2-5-1-La rangée

Une rangée est définie par deux nœuds. Puisque l'origine a pour coordonnées 0,0,0, une rangée passant par l'origine sera notée par les coordonnées du premier nœud rencontré sur elle à partir de l'origine. Soit  $u, v, w$  ces coordonnées. Une telle rangée est une suite de nœuds périodiques. On note  $[uvw]$  la direction de la rangée ; les nombres  $u, v, w$  sont appelés les indices de la rangée.

Exemple:

La rangée  $[4\ 3\ 1]$

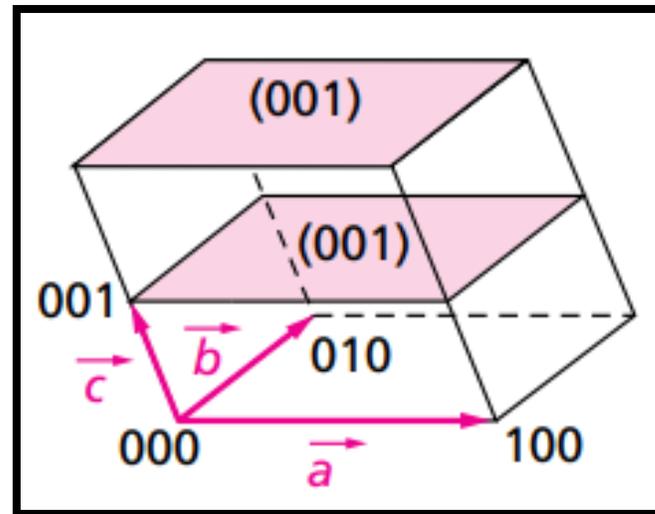


## 2-Système cristallin

### 2-5-Rangées et Plans réticulaires

#### 2-5-2-Le plan

Il est aussi possible de définir le système cristallin comme étant un ensemble de plans parallèles équidistants contenant chacun une infinité (cristal parfait) de nœuds : on parle alors de réseau stratifié. Trois nœuds non alignés définissent un plan réticulaire. Tous les plans parallèles à ce dernier sont dirigés par un même plan vectoriel, que l'on peut caractériser par son vecteur normal de composantes.



## 2-Système cristallin

### 2-5-Rangées et Plans réticulaires

#### 2-5-2-Le plan

l'équation d'un plan réticulaire ne passant pas par l'origine et dirigé par ce plan vectoriel est :  $hu + kv + lw = m$ . ( $h, k, l$  des entiers)

$u, v$  et  $w$  sont les coordonnées du vecteur reliant l'origine  $O (0,0,0)$  du repère  $oxyz$  avec un autre point qui se trouve sur la surface de la maille.

$h, k$  et  $l$  sont les inverses des longueurs découpées sur les axes  $ox, oy$  et  $oz$  respectivement par le plan noté  $(hkl)$ .

## 2-Système cristallin

### 2-5-Rangées et Plans réticulaires

#### 2-5-2-Le plan

Par définition, les indices de Miller, notés  $(hkl)$ , sont les inverses des intersections du plan avec les trois axes du cristal considéré mesurés en fonction des longueurs  $a$ ,  $b$  et  $c$  avec la condition : l'origine des axes ne doit pas appartenir au plan à repérer.

En pratique, on procède de la façon suivante :

- \*On détermine les coordonnées des intersections du plan avec les axes  $Ox$ ,  $Oy$  et  $Oz$  en fonction des longueurs  $a$ ,  $b$  et  $c$  ;
- \*On prend les inverses de ces intersections ;
- \*On réduit les trois fractions au plus petit commun dénominateur ;
- \*On prend les trois numérateurs ainsi obtenus représentant les trois indices  $h$ ,  $k$  et  $l$  par rapport aux trois axes  $Ox$ ,  $Oy$  et  $Oz$ .

## 2-Système cristallin

### 2-5-Rangées et Plans réticulaires

#### 2-5-2-Le plan

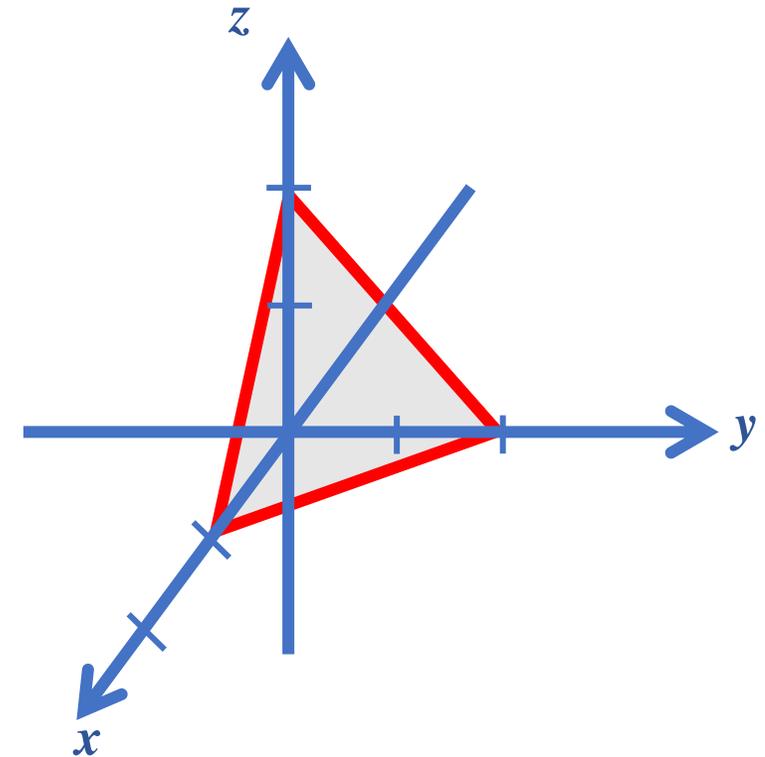
*Exemple 1* : Soit la face représentée sur la figure ci-dessous ; déterminer les indices de Miller ( $hkl$ ) de cette face.

\*Les coordonnées des intersections du plan avec les axes  $Ox$ ,  $Oy$  et  $Oz$  sont **(1, 2, 2)**.

\*Les inverses de ces intersections ; **(1/1, 1/2, 1/2)**.

\*Réduction des trois fractions au plus petit commun dénominateur ; **(2, 1, 1)**.

\*Les trois indices  $h$ ,  $k$  et  $l$  par rapport aux trois axes  $Ox$ ,  $Oy$  et  $Oz$ . **(211)**.



## 2-Système cristallin

### 2-5-Rangées et Plans réticulaires

#### 2-5-2-Le plan

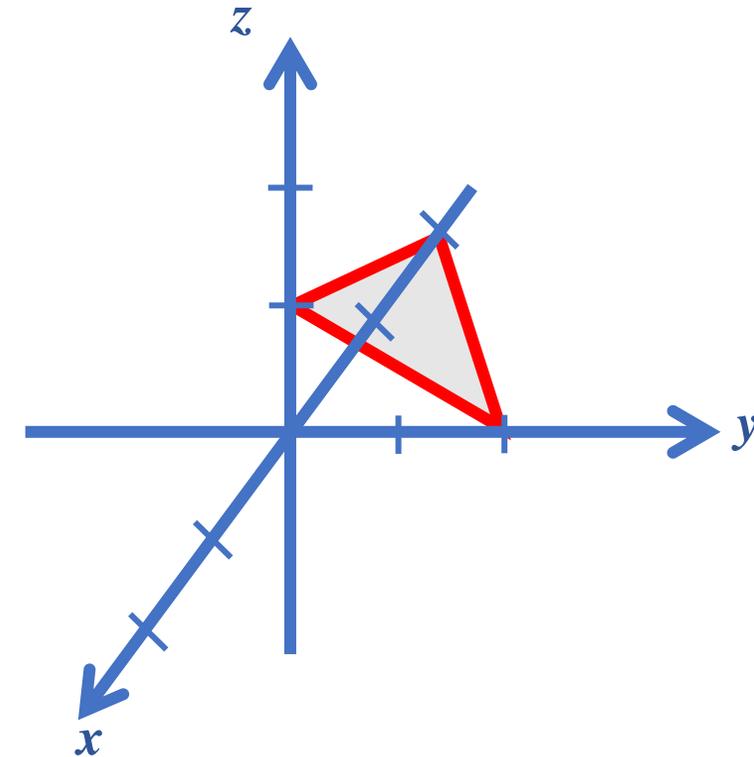
*Exemple 2* : Soit la face représentée sur la figure ci-dessous ; déterminer les indices de Miller ( $hkl$ ) de cette face.

\*Les coordonnées des intersections du plan avec les axes  $Ox$ ,  $Oy$  et  $Oz$  sont  **$(-2, 2, 1)$** .

\*Les inverses de ces intersections ;  **$(-1/2, 1/2, 1/1)$** .

\*Réduction des trois fractions au plus petit commun dénominateur ;  **$(-1, 1, 2)$** .

\*Les trois indices  $h$ ,  $k$  et  $l$  par rapport aux trois axes  $Ox$ ,  $Oy$  et  $Oz$ .  **$(\bar{1}12)$** .



## 2-Système cristallin

### 2-5-Rangées et Plans réticulaires

#### 2-5-2-Le plan

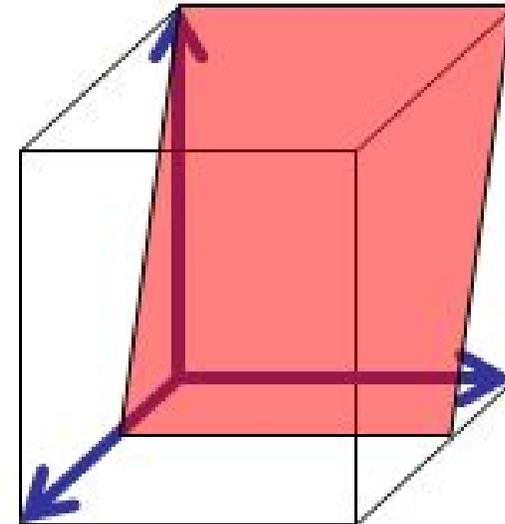
*Exemple 3* : Soit la face représentée sur la figure ci-dessous ; déterminer les indices de Miller ( $hkl$ ) de cette face.

\*Les coordonnées des intersections du plan avec les axes  $Ox$ ,  $Oy$  et  $Oz$  sont  **$(1/2, \infty, 1)$** .

\*Les inverses de ces intersections ;  **$(2, 0, 1)$** .

\*Réduction des trois fractions au plus petit commun dénominateur ;  **$(2, 0, 1)$** .

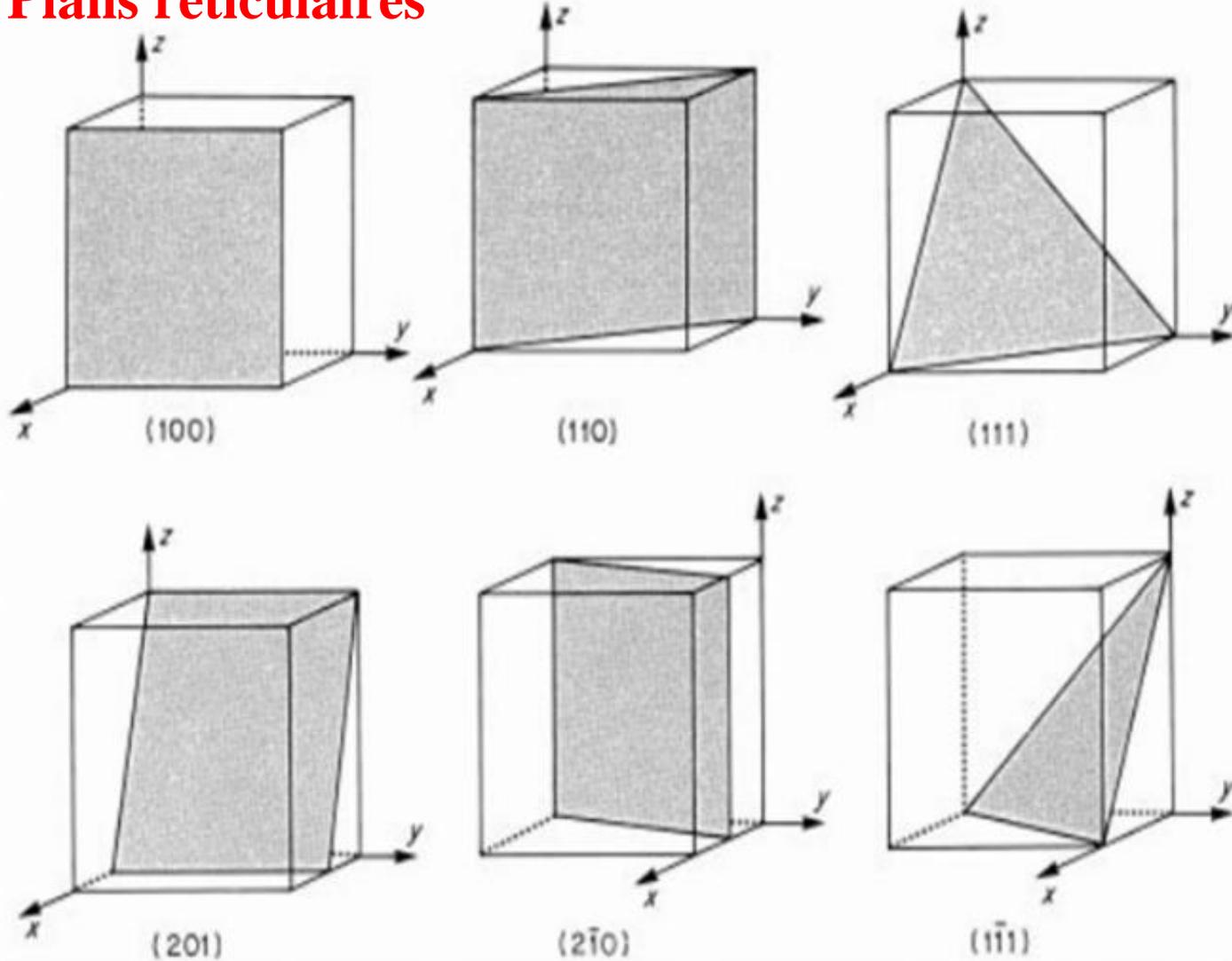
\*Les trois indices  $h$ ,  $k$  et  $l$  par rapport aux trois axes  $Ox$ ,  $Oy$  et  $Oz$ .  **$(201)$** .



## 2-Système cristallin

### 2-5-Rangées et Plans réticulaires

#### 2-5-2-Le plan

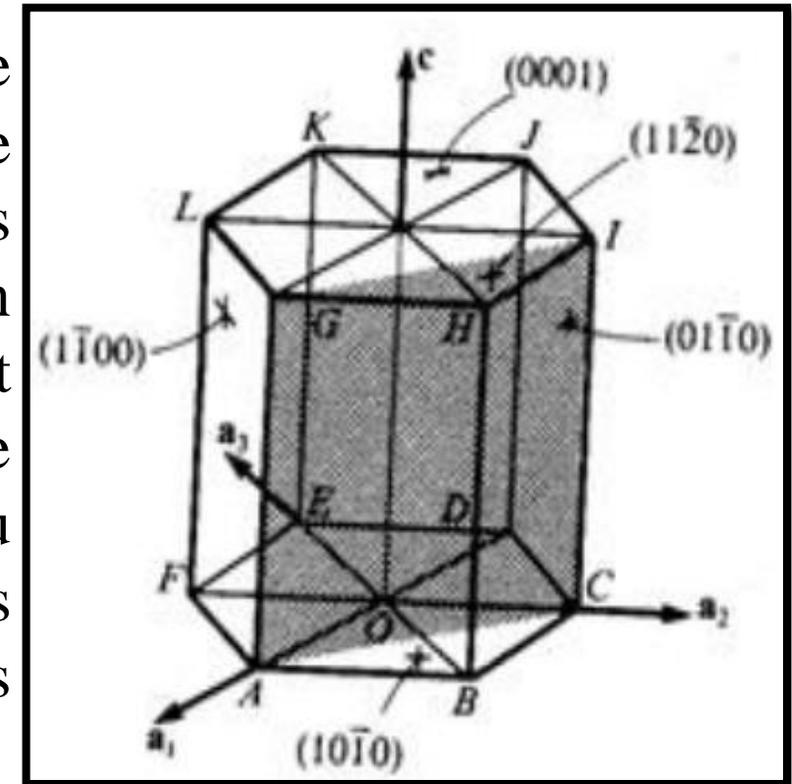


## 2-Système cristallin

### 2-5-Rangées et Plans réticulaires

#### 2-5-2-Le plan

*Exemple 3* : Dans le cas de la structure hexagonale et dans le but de distinguer les familles de plans et la symétrie hexagonale, on utilise des indices appelés indices de Miller-Bravais. Dans ce cas, on utilise quatre axes portant les vecteurs  $\vec{a}_1$ ,  $\vec{a}_2$ ,  $\vec{a}_3$ , et  $\vec{c}$ . Les trois premiers sont coplanaires et forment entre eux des angles de  $120^\circ$ ; le quatrième est normal au plan qui contient les trois premiers. En pratique, les indices de Miller-Bravais sont notés  $(hkil)$  et on les obtient de la même façon que les indices de Miller.



## 2-Système cristallin

### 2-6-Les systèmes cristallins

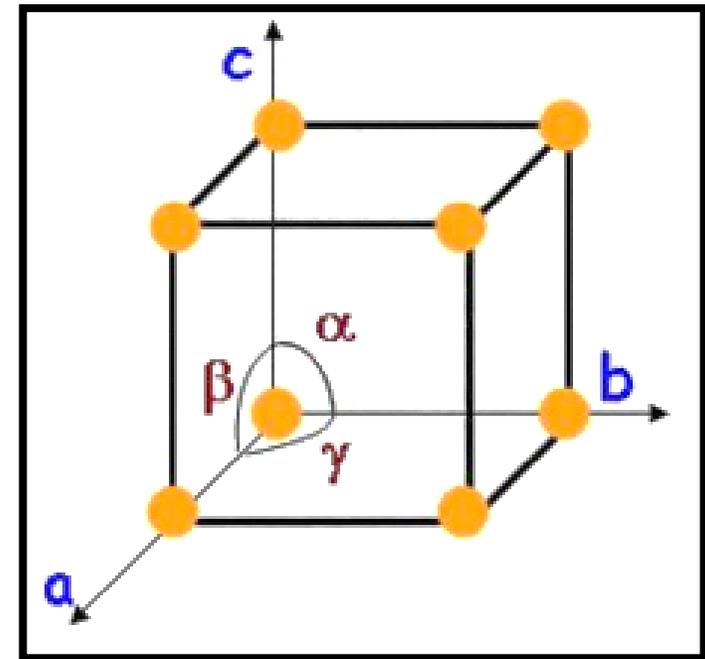
A trois dimensions, la maille est la plus petite entité (le plus petit volume) correspondant à un parallélépipède, elle est définie par trois vecteurs  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$  et  $\vec{c}$  (les périodes suivant les axes  $Ox$ ,  $Oy$  et  $Oz$ , respectivement) non coplanaires et trois angles  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ . Avec cette maille on peut remplir tout l'espace du cristal sans laisser des lacunes.

Les angles entre ces vecteurs sont  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ .

\* $\alpha$  est l'angle entre les vecteurs  $\vec{b}$  et  $\vec{c}$

\* $\beta$  est l'angle entre les vecteurs  $\vec{a}$  et  $\vec{c}$

\* $\gamma$  est l'angle entre les vecteurs  $\vec{a}$  et  $\vec{b}$



## 2-Système cristallin

### 2-6-Les systèmes cristallins

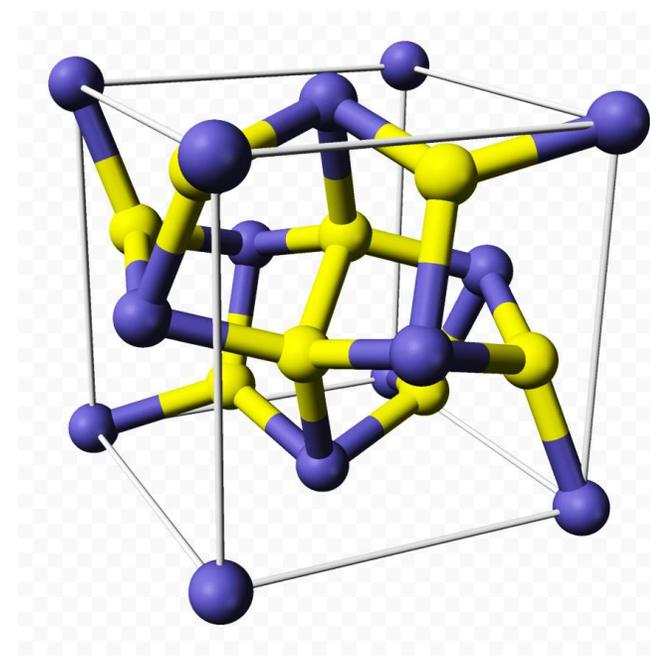
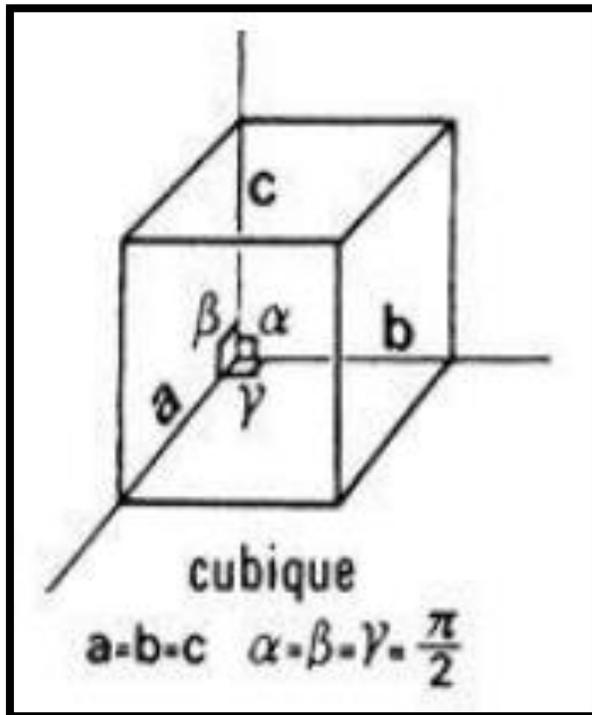
Parmi toutes les mailles possibles, certaines sont plus symétriques que d'autres. Par exemple, une maille cubique est un cube : ses côtés sont égaux et ses angles sont droits. On dit alors que le cristal dans lequel on peut trouver une telle maille appartient au système cubique.

Les sept modèles cristallins possibles sont les suivants :

## 2-Système cristallin

### 2-6-Les systèmes cristallins

**1- Cubique ou isométrique** : ce système comprend des cristaux présentant trois axes, tous perpendiculaires entre eux et tous de même longueur. L'élément de base est un cube (exemple: la pyrite  $\text{FeS}_2$ ).

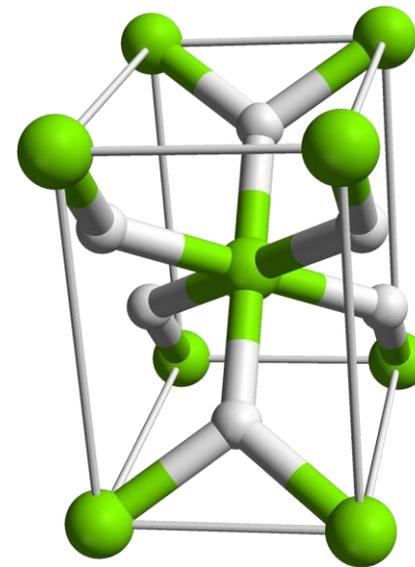
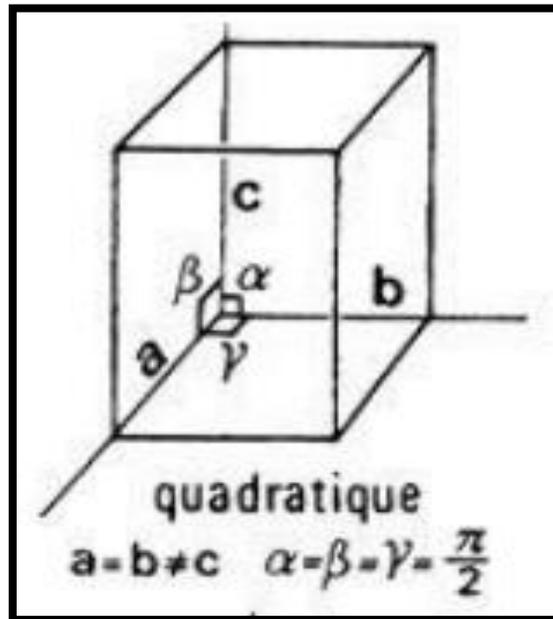


$$\begin{aligned} a &= 0,5418 \text{ nm} \\ b &= 0,5418 \text{ nm} \\ c &= 0,5418 \text{ nm} \\ \alpha &= 90^\circ \\ \beta &= 90^\circ \\ \gamma &= 90^\circ \end{aligned}$$

## 2-Système cristallin

### 2-6-Les systèmes cristallins

**2- Tétragonal ou quadratique** : ce système comprend des cristaux présentant trois axes, tous perpendiculaires entre eux et dont deux sont de même longueur. L'élément de base est un prisme droit à base carrée (exemple: la rutile  $\text{TiO}_2$ ).

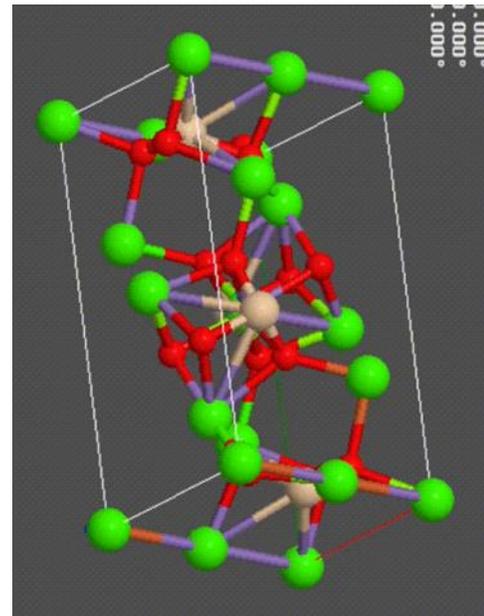
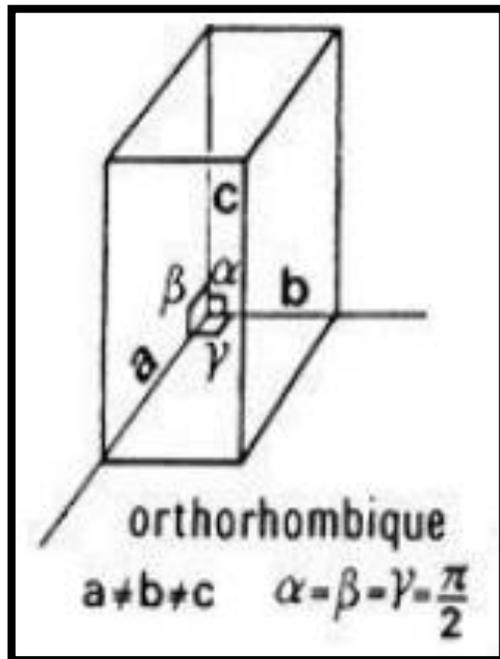


$$\begin{aligned} a &= 0,4594 \text{ nm} \\ b &= 0,4594 \text{ nm} \\ c &= 0,2959 \text{ nm} \\ \alpha &= 90^\circ \\ \beta &= 90^\circ \\ \gamma &= 90^\circ \end{aligned}$$

## 2-Système cristallin

### 2-6-Les systèmes cristallins

**3- Orthorhombique** : ce système comprend des cristaux présentant trois axes, tous perpendiculaires entre eux et tous de longueur différente. L'élément de base est un parallélépipède rectangle (Exemple: la fayalite  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ).

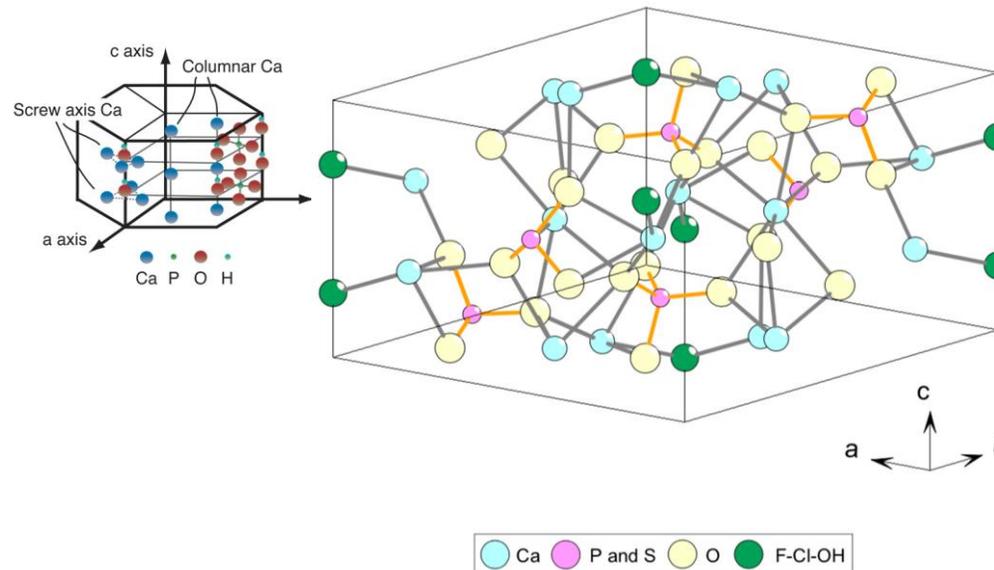
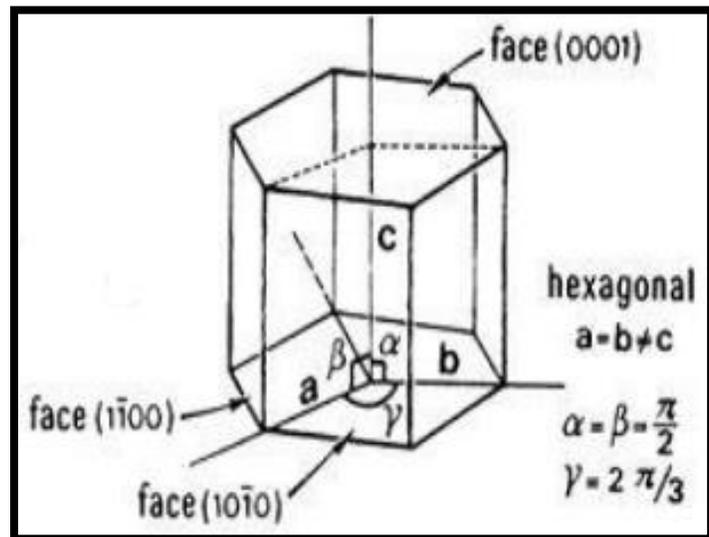


$$\begin{aligned} a &= 0,4820 \text{ nm} \\ b &= 1,0479 \text{ nm} \\ c &= 0,6087 \text{ nm} \\ \alpha &= 90^\circ \\ \beta &= 90^\circ \\ \gamma &= 90^\circ \end{aligned}$$

## 2-Système cristallin

### 2-6-Les systèmes cristallins

**4- Hexagonal :** ce système comprend des cristaux présentant quatre axes. Trois de ces axes, de même longueur, sont dans un même plan et font entre eux un angle de  $120^\circ$ . Le quatrième axe, perpendiculaire aux trois autres, est un axe d'ordre 6 (rotation de  $60^\circ$ ). L'élément de base est un prisme droit à base losange (exemple: Apatite  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$ ).

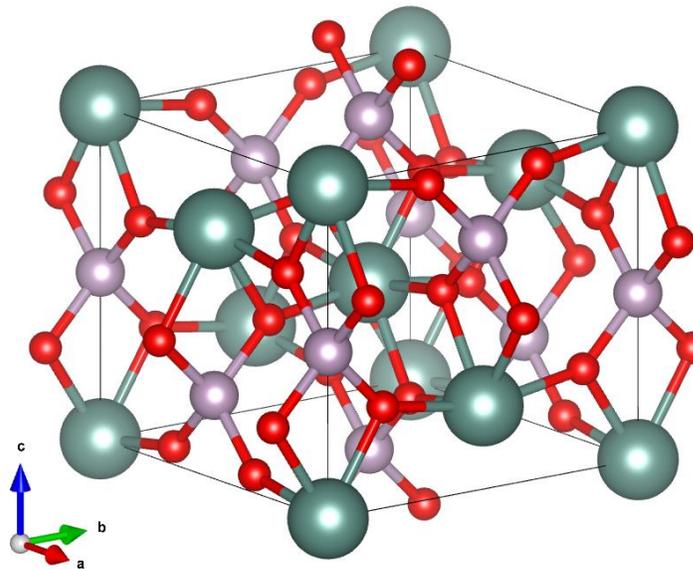
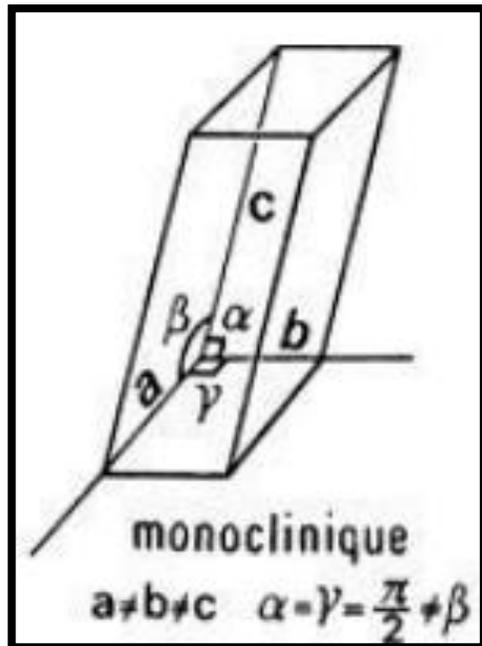


$a = 0,9370 \text{ nm}$   
 $b = 0,9370 \text{ nm}$   
 $c = 0,6880 \text{ nm}$   
 $\alpha = 90^\circ$   
 $\beta = 90^\circ$   
 $\gamma = 120^\circ$

## 2-Système cristallin

### 2-6-Les systèmes cristallins

**5- Monoclinique** : ce système comprend des cristaux présentant trois axes de longueur inégale, dont deux forment un angle différent de  $90^\circ$ , le troisième leur étant perpendiculaire. L'élément de base est un prisme oblique à base losange (exemple: l'orthoclase  $K[Si_3AlO_8]$ ).

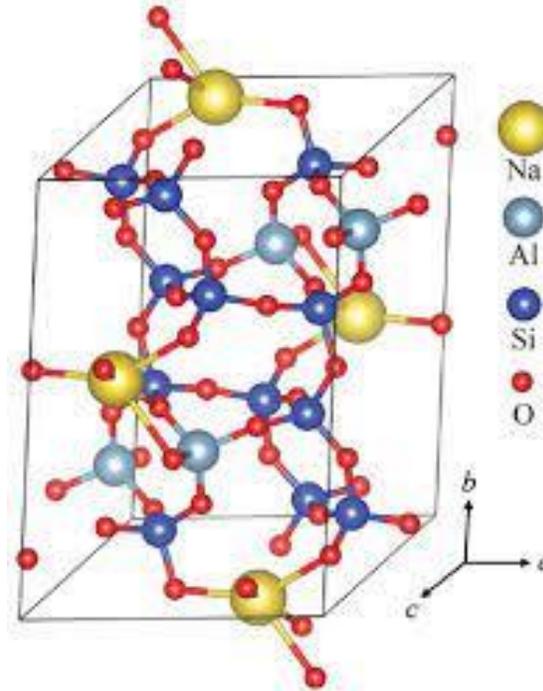
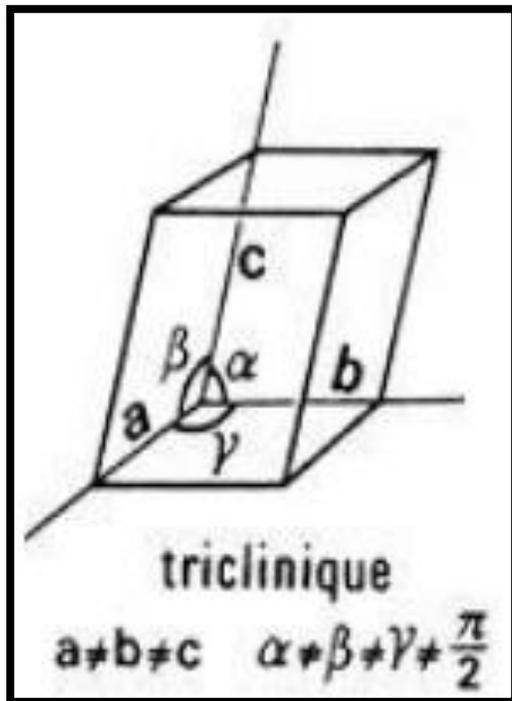


$$\begin{aligned} a &= 0,8600 \text{ nm} \\ b &= 1,3020 \text{ nm} \\ c &= 0,7220 \text{ nm} \\ \alpha &= 90^\circ \\ \beta &= 116,5^\circ \\ \gamma &= 90^\circ \end{aligned}$$

## 2-Système cristallin

### 2-6-Les systèmes cristallins

**6- Triclinique** : ce système comprend des cristaux présentant trois axes de longueur inégale et formant entre eux des angles différents de  $90^\circ$ . L'élément de base est un parallélépipède à base losange (exemple: albite  $\text{Na}[\text{Si}_3\text{AlO}_8]$ ).

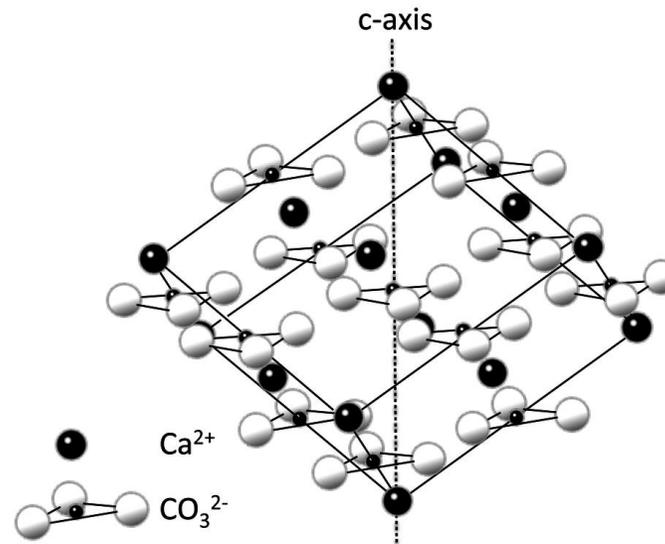
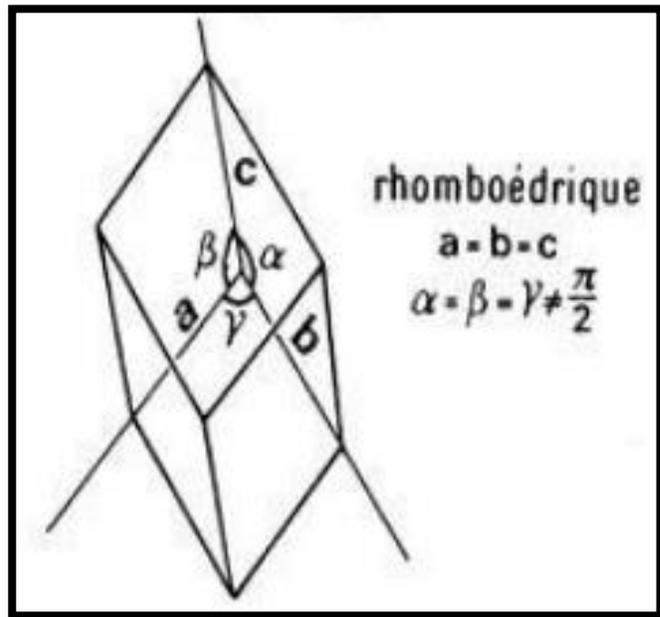


$$\begin{aligned} a &= 0,8277 \text{ nm} \\ b &= 1,2860 \text{ nm} \\ c &= 0,7181 \text{ nm} \\ \alpha &= 93,3^\circ \\ \beta &= 116,2^\circ \\ \gamma &= 87,6^\circ \end{aligned}$$

## 2-Système cristallin

### 2-6-Les systèmes cristallins

**7- Rhomboédrique** : ce système est identique au système hexagonal, mais le quatrième axe est d'ordre 3 (rotation de  $120^\circ$ ). L'élément de base est un parallélépipède dont toutes les faces sont des losanges (exemple calcite  $\text{CaCO}_3$ ).



$a = 0,6360 \text{ nm}$

$b = 0,6360 \text{ nm}$

$c = 0,6360 \text{ nm}$

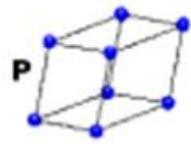
angle entre les axes :  $46^\circ 6'$

## 2-Système cristallin

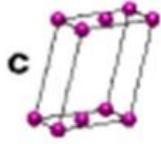
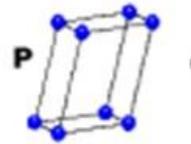
### 2-6-Les systèmes cristallins

- La maille est parfois primitive (P) avec un seul site par maille.
- Si un deuxième site existe au centre de la maille, c'est une maille centrée (I; Internal centered mode).
- Lorsque chacune des 6 faces comportent un site (F; face centered mode), ce site étant commun à deux mailles contigües, cela fait 4 sites par maille.
- On rencontre parfois aussi des mailles avec seulement deux faces centrées (C; side-face centered mode).

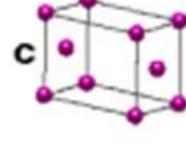
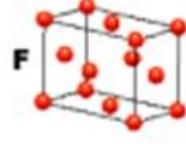
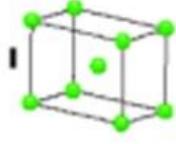
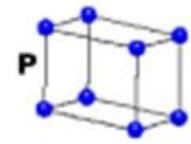
Tout réseau cristallin dérivera alors de l'un des quatorze réseaux de Bravais.



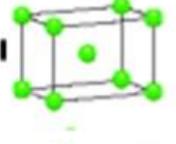
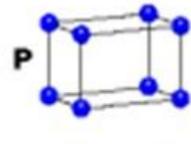
*Triclinique*



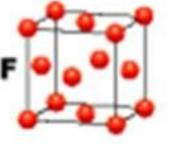
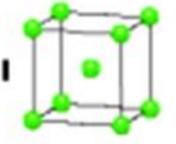
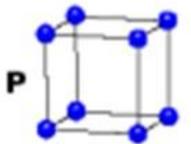
*Monoclinique*



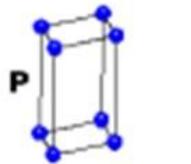
*Orthorhombique*



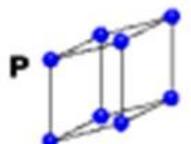
*Quadratique*



*Cubique*



*Hexagonal  
Maille simple losange*



*Trigonal  
(Rhombodrique)*

*Merci*

