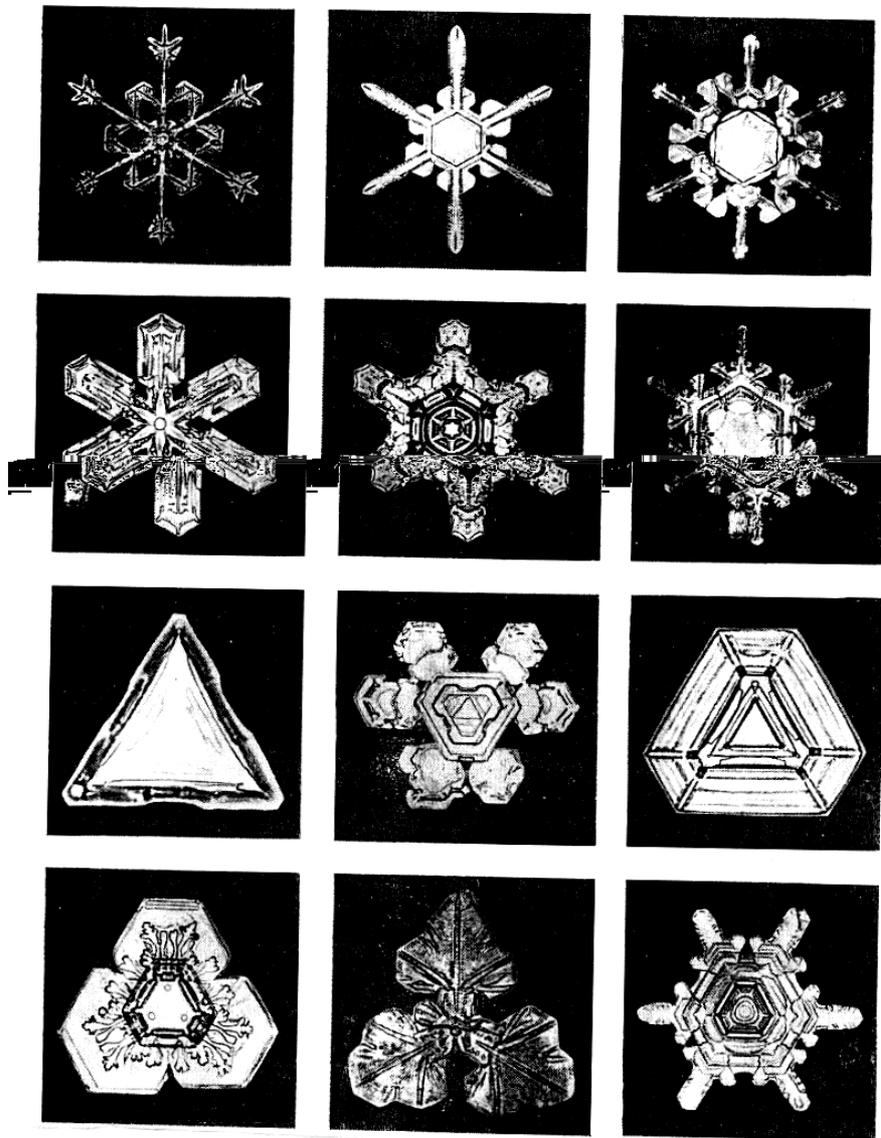


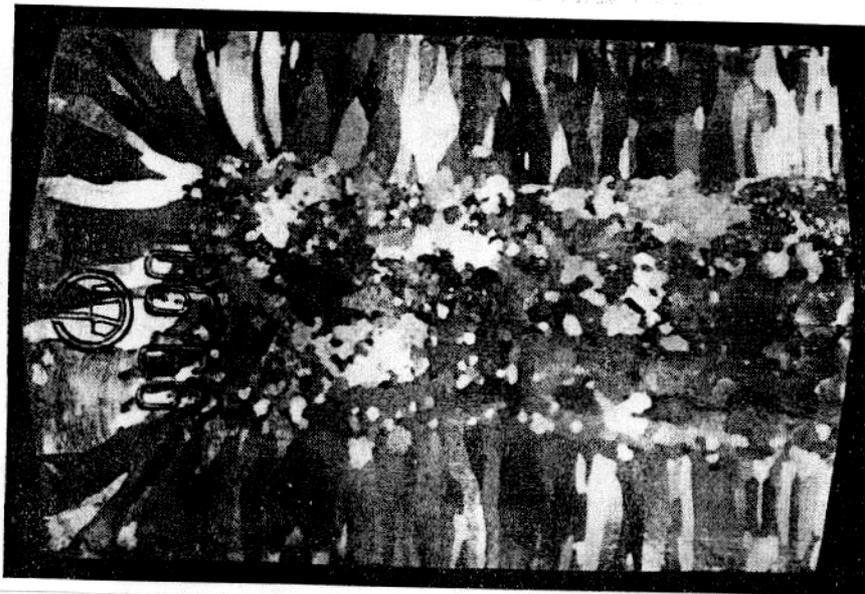
1. NOTIONS DE CRISTALLOGRAPHIE

La cristallographie est une science qui étudie les cristaux c'est à dire la formation, la croissance, la forme extérieure, la structure interne et les propriétés physiques de la matière cristallisée. Le mot cristal à son origine grecque qui veut dire glace. C'est au 19^{ème} siècle que la cristallographie se dégagaa progressivement de la minéralogie et se rapprocha de la physique et de la chimie en devenant une science indépendante. Les figures 66 et 67 représentent :

- des cristaux de neige fig. 66,
- des cristaux de bloc d' aluminium refroidit, dont la surface est polie et attaquée par un agent chimique. Les cristaux allongés sur le contour à partir desquels le refroidissement est parti et les petits grains de cristaux au cœur (fig. 67).



(fig. 66)



(fig. 67)

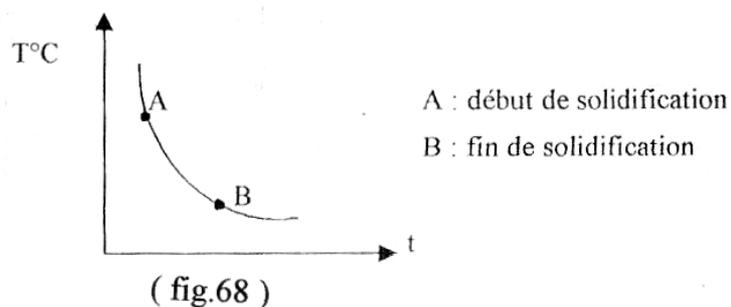
1.1. Corps cristallins et corps amorphes

Par structure cristalline on entend l'arrangement des atomes dans un cristal. Un cristal est défini comme étant un corps solide qui a une structure réticulaire et se compose d'atomes (ions) répartis suivant une succession déterminée qui se produit périodiquement dans les trois dimensions. L'absence de structure réticulaire caractérise le corps amorphe.

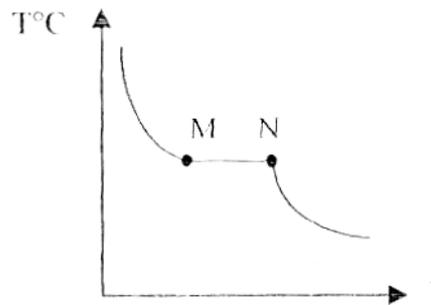
Les propriétés des corps amorphes diffèrent largement de celle des corps cristallins. Les corps amorphes sont caractérisés par la disposition chaotique de leurs atomes ce qui donne une structure interne désordonnée (comme un liquide). Un corps amorphe n'a pas de forme géométrique naturelle, ils sont assimilés à des liquides figés. Les corps amorphes sont caractérisés par :

- L'absence d'une température de fusion nettement déterminée.
- L'isotropie (mêmes propriétés dans les différentes directions) surtout les propriétés physiques.

On trouve ainsi une différence caractéristique dans les courbes de refroidissement des corps amorphes et cristallins, le refroidissement des corps amorphes se traduit par une courbe décroissante et continue (fig. 68).

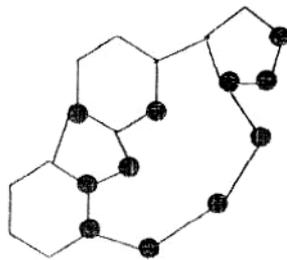


Tandis que celui des corps cristallins présente un palier en température qui marque le début et fin de solidification (cristallisation), comme le montre la figure 69.



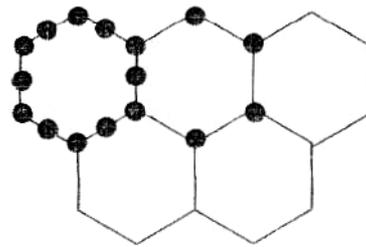
(fig.69)

Tous les corps solides peuvent être amorphes ou cristallins, il existe un grand nombre de corps solides amorphes. Les verres représentent un exemple bien connu des corps amorphes, les SiO_4 , composants les verres sont désorientés les uns par rapport aux autres (fig. 70), dans un solide ils seraient répartis régulièrement (fig. 71).



(fig.70)

Structure amorphe



(fig.71)

Structure cristalline

Aujourd'hui les solides amorphes représentent un grand intérêt dans le domaine de la technologie. Les semi-conducteurs amorphes peuvent remplacer des composants électroniques. Des mémoires d'ordinateurs ont été élaborées à partir de matériaux amorphes.

Dans le même ordre d'idée, les liquides ne sont pas tous amorphes. Certains d'entre eux présentent une organisation périodique et les molécules s'orientent les unes par rapport aux autres au sein du liquide. C'est le cas des cristaux liquides dont les propriétés optiques dépendent étroitement des perturbations extérieures (température, pression, champ électrique ou magnétique). Ils permettent la transformation de signaux de nature diverses en signaux optiques, le cas du télévision ultra-plat s'accrochant au mur.

1.2. Propriétés des corps cristallins

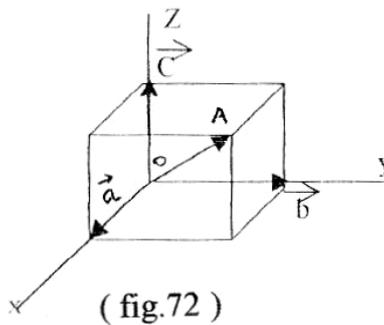
les corps cristallins sont caractérisés par les propriétés suivantes :

- a. Ils sont caractérisés par une certaine anisotropie (les propriétés physiques ne sont pas les mêmes dans les différentes directions), l'anisotropie peut être constatée à l'échelle macro et microscopique.
- b. Un matériau cristallin peut présenter soit :
- Un monocristal (cristal unique) par exemple le cristal de quartz, de calcite, de diamant etc.
 - Un polycristal ou une agglomération de petits cristaux (échantillon d'acier).
- c. Les cristaux sont caractérisés par des faces planes, des arêtes rectilignes et des sommets tels :

$$F + S = A + 2$$

F : faces, S : sommets, A : arêtes.

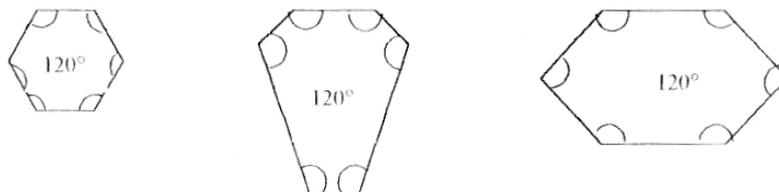
Les faces sont caractérisées par deux lois : Si l'on rapporte les différentes faces d'un cristal à un système de coordonnées à 3 dimensions, la position d'une face quelconque peut toujours être exprimée par trois nombres entiers simples. Si on fait intervenir la notion de réseau tridimensionnel, la position de tout point du réseau peut être indiquée par des coordonnées par rapport à un système d'axes dont l'origine est placée en un nœud du réseau (fig. 72).



Un point quelconque A est défini par le vecteur \vec{OA}

$$\vec{OA} = p\vec{a} + q\vec{b} + r\vec{c} \quad \text{avec } p, q, r : \text{entiers}$$

- d. Constante des angles dièdres l'angle formé par deux faces déterminées est constant dans tous les cristaux d'une même espèce chimique. Si nous coupons un cristal de quartz perpendiculairement à l'axe vertical, on obtient plusieurs configurations mais avec des angles rigoureusement égaux à 120° , (fig. 73).

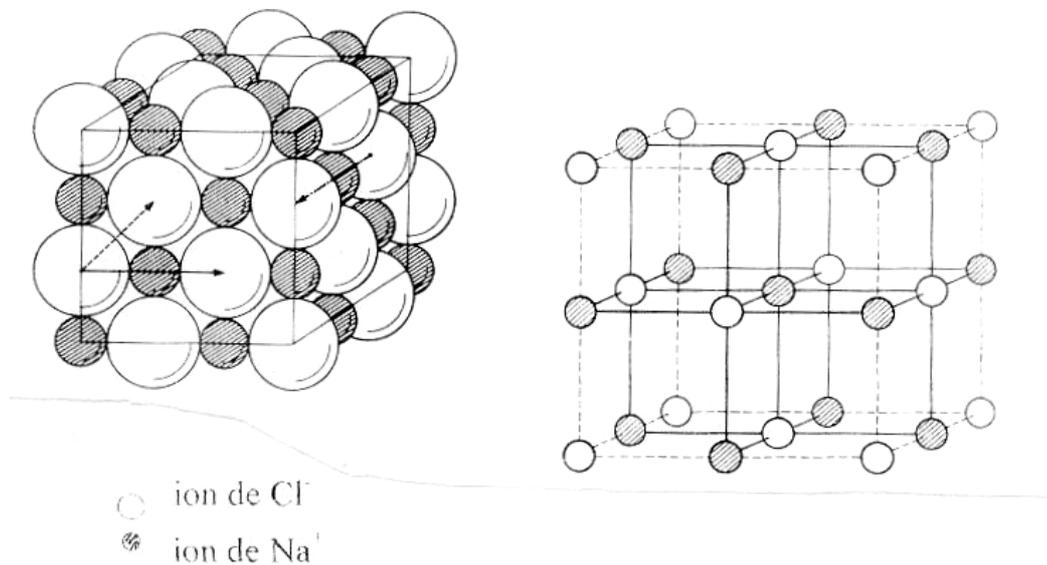


(fig.73) coupes transversales

- e. La plupart des cristaux se comportent d'une façon inattendue par rapport à la lumière. Les rayons lumineux se propagent à des vitesses différentes dans les milieux cristallins.
- f. Les propriétés d'un cristal peuvent avoir la même valeur dans plusieurs directions et l'on décèle suivant ces directions une symétrie de diverses natures.

1.3. Structure réticulaire

Pour expliquer les particularités observées dans les cristaux, on doit admettre que tout corps cristallin a une structure ordonnée réticulaire qui est indépendante de la nature et de la forme des particules matérielles élémentaires constituant le cristal. Donc pour représenter schématiquement une structure cristalline, on emploie un réseau à trois dimensions. Sur la (fig. 74), l'exemple du réseau de NaCl.

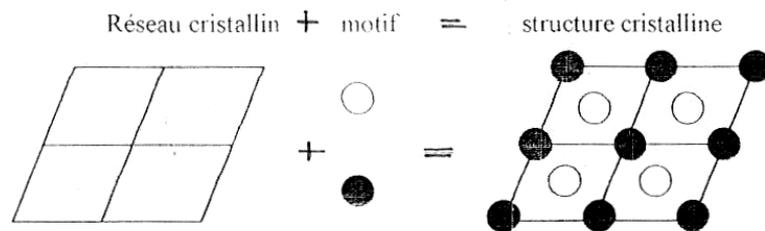


(fig.74)

Un réseau cristallin est constitué par un assemblage d'atomes (ions) arrangés suivant un motif qui se reproduit périodiquement dans les trois dimensions. Donc un réseau cristallin est un réseau spatial imaginaire ayant pour nœuds les atomes (sommets des parallélépipèdes). Les droites passant par ces nœuds sont appelées rangés.

Tous les nœuds sont groupés dans des plans parallèles équidistants appelés plans réticulaires, la distance entre deux plans voisins de la même famille est la distance inter-réticulaire.

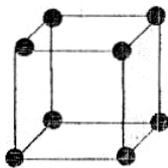
Tous les parallélépipèdes qui ont pour sommets les nœuds sont appelés maille du réseau, c'est à dire le volume minimal d'un cristal qui permet de juger de la structure atomique du volume tout entier s'appelle maille cristalline élémentaire comme le montre la (fig. 75).



(fig.75)

- **Maille élémentaire** : c'est aussi le plus petit parallélépipède qui permet de reproduire tous les réseaux tridimensionnels par translation continue de ces éléments suivant les trois directions. Un réseau cristallin d'un solide est composé d'un nombre infini de mailles élémentaires à l'intérieur desquelles les atomes sont disposés dans un ordre bien défini.
- **Motif** : c'est la reproduction indéfiniment et régulièrement des atomes ou ions dans le cristal, l'ensemble régulier de motifs est appelé réseau :
 - Contrairement au motif le nœud n'a pas de réalité physique.
 - La rangée du réseau est un ensemble de nœuds alignés, c'est une droite passant par des nœuds du réseau. La distance qui sépare deux nœuds consécutifs d'une rangée est appelée période ou paramètre de rangée.
- **Maille du réseau** : Le réseau est théoriquement infini, ainsi pour le décrire, on choisit une unité structurale qui le reproduit par translation. Cette unité c'est la maille élémentaire. On distingue la maille simple ou primitive et la maille multiple

a. Maille simple ou primitive : Dont les sommets sont constitués de huit nœuds tous voisins quelque soit la rangée considérée. Elle ne contient de nœuds ni dans son volume, ni sur ses faces, ni sur ses arêtes (fig. 76). On désigne la maille primitive par la lettre P, il y a autant de mailles P que de nœuds dans le réseau ; en effet chaque nœud est commun à huit mailles. P et chaque maille P correspond à huit nœuds. A chaque maille on peut donc associer un nœud.



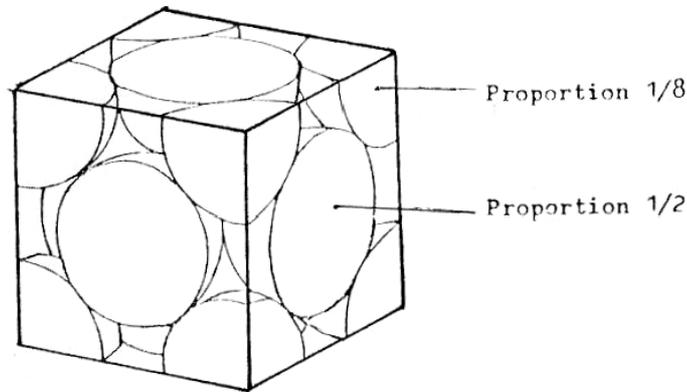
(fig.76)

Si chaque nœud est commun à 8 mailles P donc cette dernière contient : $1/8 \times 8 = 1$ atome.

Pour toute maille élémentaire :

- Les nœuds à l'intérieur des mailles comptent pour 1.
- Les nœuds au sommet des mailles comptent pour $1/8$.
- Les nœuds sur les arêtes des mailles comptent pour $1/4$.
- Les nœuds sur une face de maille compte pour $1/2$.

La figure 77, ci-dessous, nous montre une coupe schématique d'une maille cubique à faces centrées montrant la proportion 1/8 au niveau de chaque sommet et la proportion 1/2 pour chacun des atomes situés sur les faces.

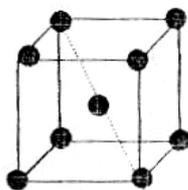


(fig.77)

b. Mailles multiples : Dans la catégorie des mailles multiples, en plus des huit sommets du parallélépipède, elles contiennent des nœuds dans le volume ou sur les faces, d'où l'on distingue :

1. Maille multiple centrée (fig. 78) :

Elle est désignée par l'abréviation I, elle contient des nœuds aux sommets et un nœud au centre du parallélépipède, c'est une maille double.

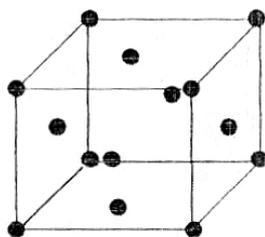


(fig.78)

Sommets :
 $8 \times 1/8 = 1$
 et 1 au centre
 au total $1 + 1 = 2$ nœuds

2. Maille multiple à faces centrées (fig. 79) :

Désignée par la lettre F et contient huit nœuds aux sommets et six aux centres des faces, c'est une maille quadruple.

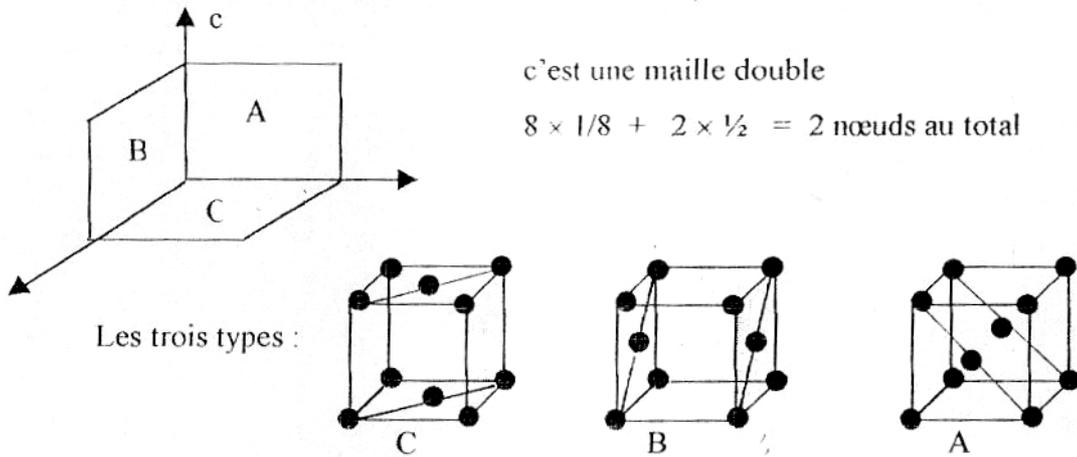


(fig.79)

$8 \times 1/8 + 6 \times 1/2 = 4$ nœuds au total.
 Les nœuds des faces comptent pour $1/2$.

3. Mailles multiples à faces centrées (fig. 80) :

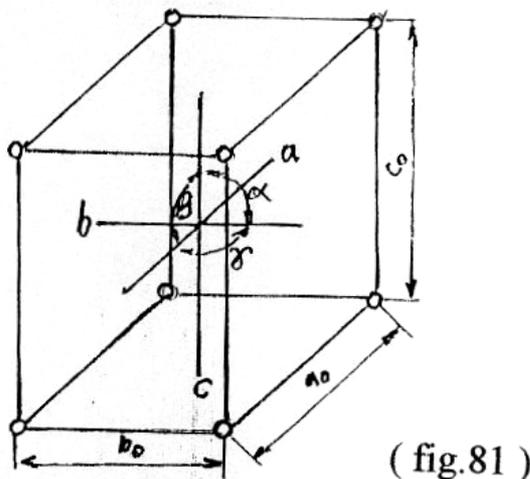
Elle contient des nœuds aux sommets et sur l'une des espèces de bases A, B ou C.



(fig.80)

1.4. Systèmes cristallins (les 14 réseaux de Bravais)

A partir de la maille cristalline élémentaire, on peut décrire de façon simple les systèmes cristallins existant dans la nature. En combinant les différentes relations entre les paramètres a, b, c et les angles α, β, γ du trièdre de référence (paramètres angulaires) comme le montre la (fig. 81).



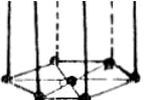
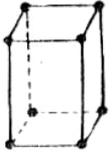
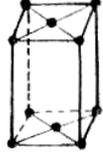
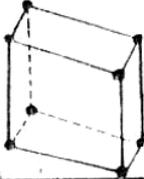
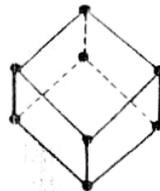
(fig.81)

Bravais a déterminé 14 réseaux tridimensionnels fondamentaux. Ils sont de quatre modes différents (multiplicité) :

- Réseaux simples ou primitifs P.
- Réseaux à bases centrées A, B ou C selon le type de faces centrées.
- Réseaux centrés I.
- Réseaux à faces centrées F.

Les sept systèmes cristallins qui existent et qui ferment les réseaux de Bravais sont :
(fig. 82) :

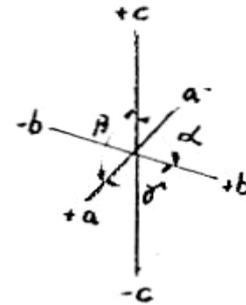
Systèmes	P	C	I	F
				

Hexagonal		—	—	—
Monoclinique			—	—
Triclinique		—	—	—
Rhomboédrique		—	—	—

(fig.82)

A. Système triclinique : le cristal fondamental est un parallélépipède oblique. Il n'admet qu'un seul centre de symétrie à l'intersection des diagonales. Il possède donc :

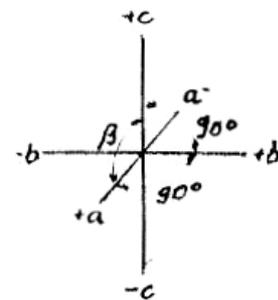
- I : centre de symétrie.
- $a \neq b \neq c$
- $\alpha \neq \beta \neq \gamma$ ($\neq 90^\circ$, inégaux, mais voisins de 90°).
- 1 seul mode de réseau de Bravais qui est le primitif (P).



Triclinique

B. Système monoclinique : le cristal fondamental est un prisme droit sur une base rhombique (en losange) incliné dans une seule direction. Il admet :

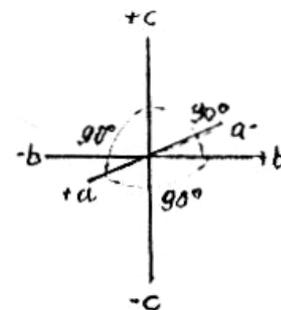
- I centre de symétrie.
- 1 seul axe de symétrie
- $a \neq b \neq c$
- $\alpha \neq \beta = 90^\circ$
- $\gamma = 90^\circ$
- 2 réseaux de Bravais : primitif (P) et à bases centrées (C).



monoclinique

C. Système orthorhombique : la Forme géométrique est un prisme droit à base rectangulaire. Il possède :

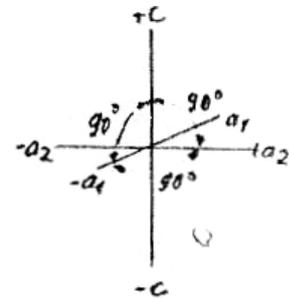
- 3 axes d'ordre 2
- 1 seul axe de symétrie
- $(a \neq b) \neq c$
- $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
- 4 réseaux de Bravais : primitif (P), à bases centrées (C), centré (I) et à faces centrées (F).



orthorhombique

D. Système quadratique ou tétragonal : le cristal fondamental est un prisme droit à base carrée. Il admet :

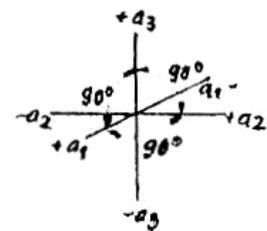
- 3 axes d'ordre 4
- 4 axes d'ordre 2 : dont deux sont orthogonaux entre eux.
- $(a = b) \neq c$
- $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
- 2 réseaux de Bravais : primitif (P) et centré (I).



Tétragonal

E. Système cubique : la forme fondamentale est un cube. Il a :

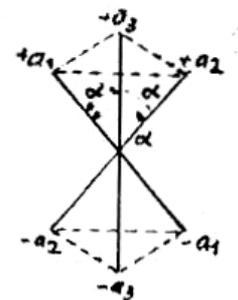
- 3 axes d'ordre 4
- 1 axes d'ordre 3
- 6 axes d'ordre 2
- $a = b = c$
- $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$
- 3 réseaux de Bravais : primitif (P), centré (I) , et à faces centrées (F).



cubique

F. Système rhomboédrique : la géométrie fondamentale est limitée par 6 losanges égaux. Il admet :

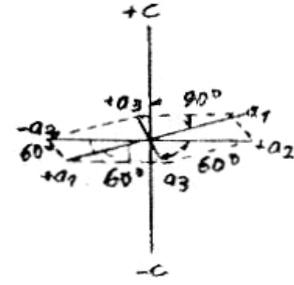
- 1 centre de symétrie
- 1 axe d'ordre 3
- 3 axes d'ordre 2
- $a = b = c$
- $(\alpha = \beta = \gamma) \neq 90^\circ$
- 1 seul réseau de Bravais : primitif (P).



rhomboédrique

G. système hexagonal : le cristal est un prisme droit à base hexagonale. Il a :

- 1 centre de symétrie
- 1 axe d'ordre 6
- 6 axes d'ordre 2
- $a = b \neq c$
- $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$
- 1 seul réseau de Bravais : primitif (P).



Hexagonal

Le réseau de la majorité des métaux utilisés dans l'industrie s'établit d'après un des systèmes suivants : à symétrie élevée et à empilement compact des atomes, cubique centré, cubique à faces centrées et hexagonal. Les métaux qui ont le réseau :

- cubique centré :

Rb, K, Na, Ti_β , Tl_β , Zr_β , Ta, W, V, Fe_β , Cr, Nb, Ba, etc.

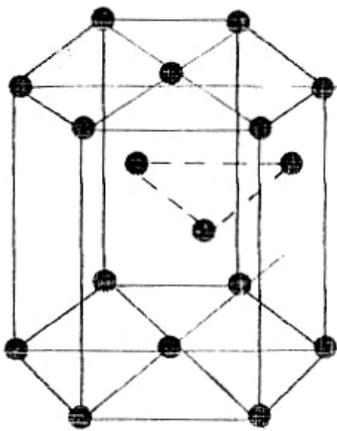
- cubique à faces centrées :

Ca_α , Ce, Sr_α , Th, Pb, Sb, Ni, Ag, Au, Pd, Pt, Rh, Ir, Fe_γ , Cu, Co, Co_α , etc.

- Hexagonal :

Hf_α , Mg, Ti_α , Cd, Ro, Os, Ru, Zn, Co_β , Bu, Ca_α , V, La_α , Tl_α , Zr_α , etc.

Un réseau hexagonal est composé d'atomes placés aux sommets et au centre des faces hexagonales du prisme, trois atomes se trouvent dans le plan médian du prisme, donc il compte 17 atomes (fig. 83).



(fig.83)

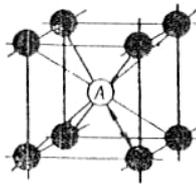
Le réseau hexagonal ne contient pas d'atomes au plan médian. La maille élémentaire d'un réseau hexagonal compte 6 atomes.

$$12 \times \frac{1}{6} + \frac{1}{2} \times 2 = 6 \text{ atomes}$$

1.5. Densité du réseau

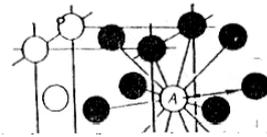
La densité du réseau cristallin, c'est à dire le volume occupé par les atomes qu'on peut considérer comme des sphères suffisamment rigides est caractérisée par l'indice de coordination ou coordinence, terme qui indique le nombre d'atomes situés à une distance égale et minimale de l'atome considéré, plus la coordinence est grande, plus l'empilement des atomes est compact.

La distance minimale entre les atomes d'une maille élémentaire cubique correspond à $a \cdot \frac{\sqrt{3}}{2}$ c'est la distance qui sépare l'atome considéré de ses 8 voisins, on en déduit que la coordinence de ce réseau est égale à 8 (C8) et le coefficient d'empilement (rapport du volume occupé par les atomes au volume de la maille, vaut environ 68% (fig. 84)

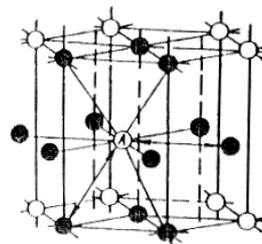


(fig.84)

Pour une maille cubique à faces centrées, la coordinence est égale à 12 (C12), chaque atome comptant 12 voisins situés à une distance minimale $d = a \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}$, ce qui correspond à la compacité maximale de l'empilement sous forme de sphères (fig. 85).



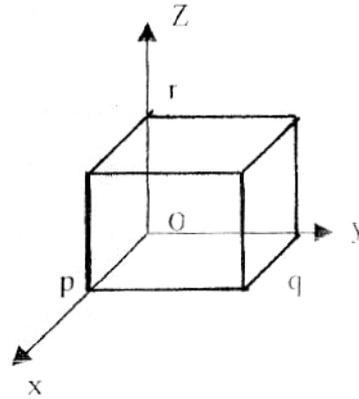
L'indice de coordinence du réseau hexagonal compact dont le rapport $C/a = 1,6333$ est 12 (H12), ce qui correspond également à une densité maximale. Lorsque la valeur de C/a se distingue nettement de 1,63 (cas du zinc et cadmium), la coordinence du réseau hexagonal est égale à 6, (fig. 86).



(fig.86)

1.6. Notions des plans ou faces cristallographiques

On peut déterminer la position dans l'espace de chaque face cristallographique au moyen de trois nombres entiers. Pour cela, on prend comme axes de coordonnées trois arêtes de la maille élémentaire et comme unité de longueur les modules de trois vecteurs de base de la maille Z , (fig. 87).



(fig.87)

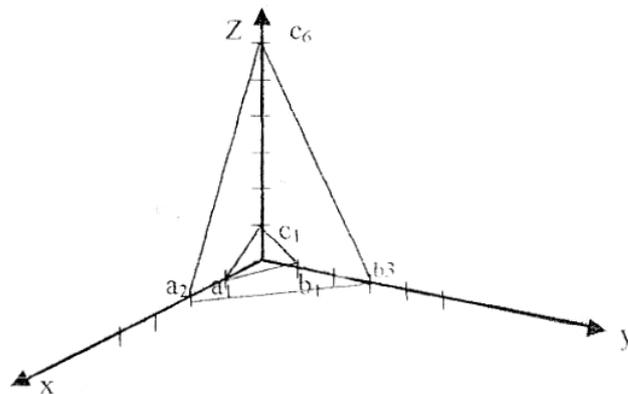
En 1838 Weiss proposa tulle méthode qui consiste après avoir défini le trièdre de référence à déterminer dans l'espace, l'orientation de chaque face cristalline à l'aide de trois caractéristiques numériques p , d , et r .

On peut repérer les faces du prisme dans le système d'axes de coordonnées ox , oy , oz par a_1 , b_1 , c_1 , et a_2 , b_3 , c_6 (fig. 88). La face a_1 , b_1 , c_1 intercepte une seule équidistance sur chacun des axes ox , oy , oz , (fig. 23).

Oa_1 , Ob_1 , Oc_1 où le rapport $p : q : r = 1$

a_2 , b_3 , c_6 où le rapport $p : q : r = 2 : 3 : 6$

L'ensemble de ces trois nombres (1,1,1) pour la première face et (2,3,6), pour la deuxième face sont les indices de Weiss des deux faces.



(fig.88)

En 1839, Miller proposa une méthode beaucoup plus commode qui est actuellement d'un emploi universel, il a remplacé les caractéristiques numériques de Weiss p, q, r par leur inverse $1/p, 1/q, 1/r$, en général on obtient 3 fractions inférieures à l'unité et dont les rapports réciproques sont exprimés par trois nombres entiers premiers entre eux appelés indices de Miller et notés (hkl) .

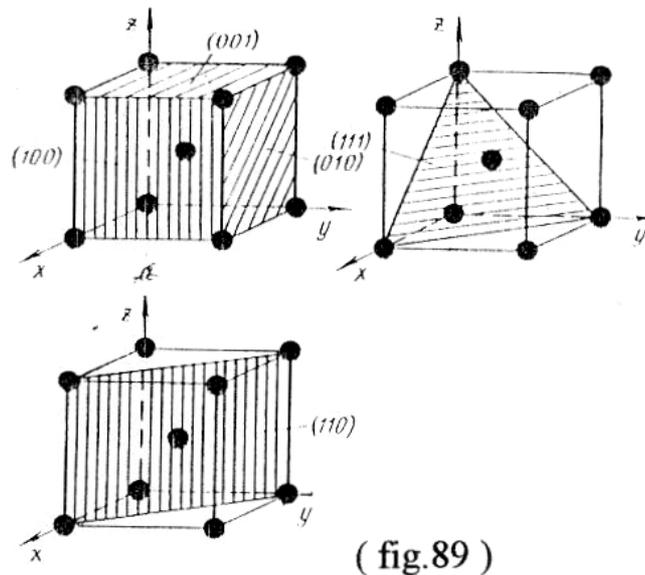
$$h = 1/p, k = 1/q \text{ et } l = 1/r$$

Donc les indices de Weiss sont $(2, 3, 6)$ et ceux de Milieu hkl $(1/2, 1/3, 1/6)$.

Remarques :

- Les indices de faces ou de plans sont toujours mis entre parenthèses sans séparation.
- Un indice négatif par exemple $(-h)$ est désigné par (\bar{h}) . (-2) s'écrit $(\bar{2})$
- Un plan parallèle à un axe le coupe à l'infini, son indice de Miller (valeur réciproque) correspond à cet axe est $1/\infty = 0$.
- Une famille de plans (hkl) est désignée par une accolade $\{hkl\}$.

Exemple de notation pour les plans d'un cube (fig. 89) :



(fig.89)

Chaque plan du cube ne coupe qu'un seul axe, les segments étant égaux.

Pour les faces avant, droites, supérieures ont respectivement $(1, \infty, \infty)$, $(\infty, 1, \infty)$ et $(\infty, \infty, 1)$. Les valeurs inversement proportionnelles aux segments tranchés sont respectivement $1, 0, 0$; $0, 1, 0$ et $0, 0, 1$ mais il est d'usage de mettre les indices des plans $h k l$ entre parenthèses et de ne pas les séparer par des virgules (100) , (010) et (001) , pour les faces arrières, gauches et inférieures ont respectivement $(\bar{1}00)$, $(0\bar{1}0)$ et $(00\bar{1})$.

Le réseau cubique, en plus des plans du cube compte des plans octaédriques comme le montre la figure 89, (111) et des plans dodécaédrique (110) .

1.7. Indices de directions

On entend par direction cristallographique, la ligne droite qui joint au minimum 2 nœuds. Pour déterminer les indices de direction dans un système d'axes de coordonnées, on choisit la ligne parallèle à la direction et qui passe par l'origine. Par la suite, on détermine les coordonnées du nœud le plus proche, les nombres ainsi déterminés sont appelés indices cristallographiques de direction et sont notés $[uvw]$.

Les droites de direction sont toujours perpendiculaires aux plans qui ont leurs mêmes indices (fig. 90).

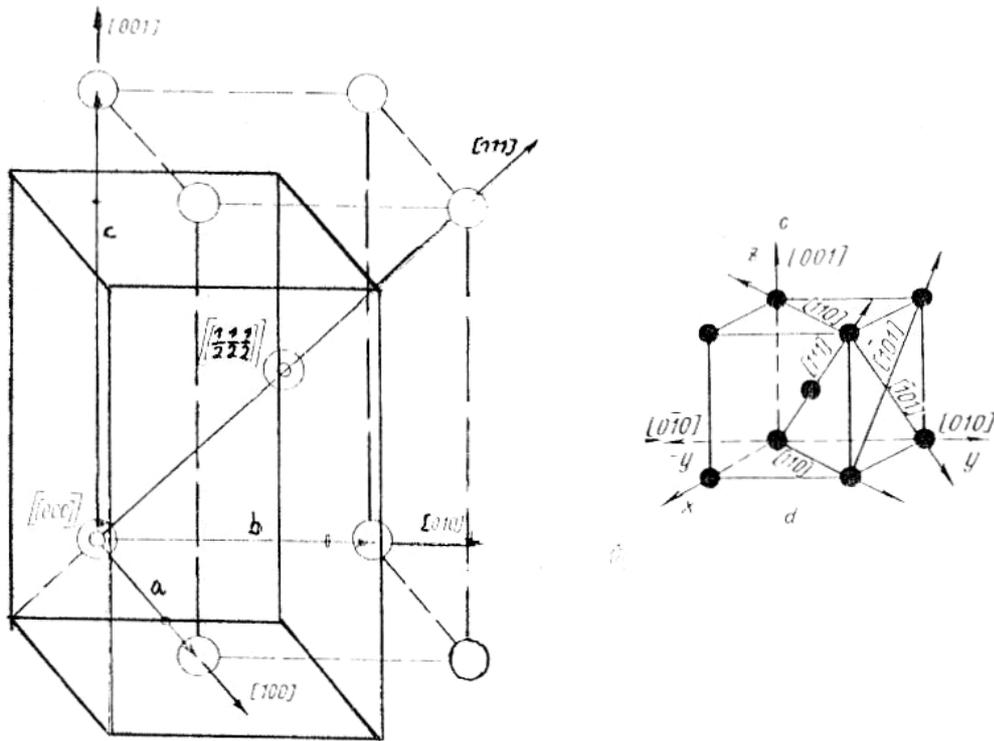


fig. 90