

## 4- Morphologie des cristaux

### 4.1. Introduction

Les cristaux se forment par la répétition en trois dimensions d'une unité de structure. Les surfaces qui limitent les cristaux, les faces des cristaux, dépendent de la forme de cette unité et des conditions de croissance. Les relations angulaires, la taille et la forme des faces sur un cristal sont des aspects de la **morphologie des cristaux**.

### 4.2. Le réseau cristallin

La symétrie observée chez les cristaux est due à l'arrangement ordonné interne des atomes dans la structure cristalline comme cela a été mentionné dans les cours précédents. Cet arrangement des atomes dans les cristaux est appelé **réseau**.

Considérons un réseau à deux dimensions (réseau plan, ou réticule). Un réseau plan consiste en un ensemble de points (appelés nœuds) ordonné. Cet ensemble est défini par la distance et la direction (ou angles) entre les points. Donc, cet ensemble peut être reproduit en spécifiant la distance et l'angle pour passer d'un point à un autre : c'est la **symétrie de translation**. Dans l'exemple de la figure 1, l'ensemble est reproduit par un déplacement vers la droite d'une distance  $a$  et vers le bas d'une distance  $b$ . L'angle entre les deux directions de translation dans ce cas est de  $90^\circ$ .

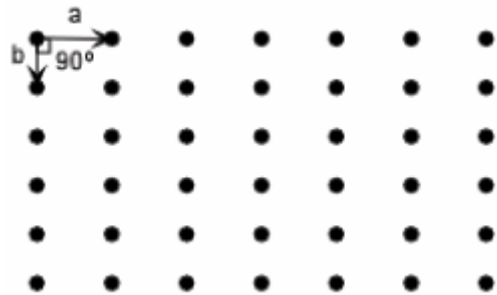


Figure 1 : Exemple d'un réseau cristallin

Dans l'exemple de la figure 2, les distances de translation  $a$  et  $b$  ne sont pas égales et l'angle de translation n'est pas  $90^\circ$ .

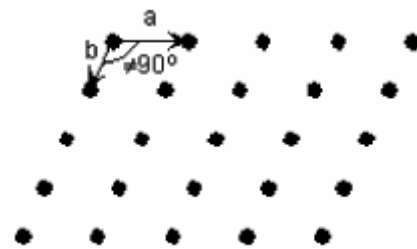


Figure 2 : Autre exemple d'un réseau cristallin

Chez les cristaux, les atomes sont rangés dans les trois directions de l'espace. L'ensemble ordonné des atomes en trois dimensions est appelé **réseau tridimensionnel**. Nous parlerons plus en détail de ces réseaux tridimensionnels dans les prochains cours. Nous continuerons cependant à étudier les réseaux plans et notons que ce qui s'applique aux réseaux plans s'applique également aux réseaux tridimensionnels.

### 4.3. Le motif

Le réseau est donc un objet mathématique descriptif. A chaque noeud de ce réseau se trouve un "motif", c'est à dire un objet physique, souvent un atome. Dans certains cas, le motif peut être une molécule (par exemple,  $I_2$  dans un cristal d'iode,  $H_2O$  dans un cristal de glace, produit organique cristallisé comme le sucre...), voir une molécule très complexe.

On peut illustrer ces notions de motif et de réseau dans le cas d'un carrelage : les carreaux sont les motifs, et leurs emplacements sont les noeuds d'un réseau (figure 3). Pour des raisons pratiques, nous représenterons en général le cas où un motif est un atome unique.

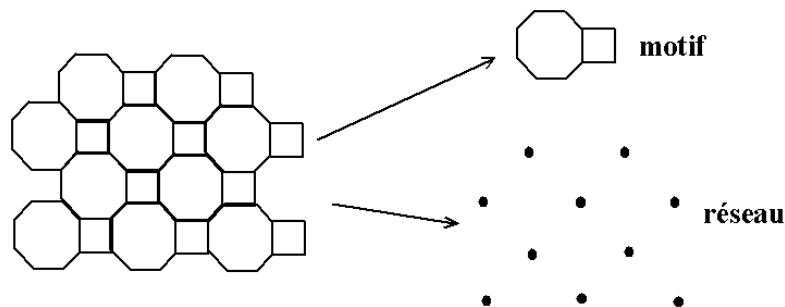


Figure 3 : Exemple de noeuds et motifs

### 4.4. Caractéristiques des réseaux cristallins

- Les faces naturelles d'un cristal se développent le long de plans définis par les points du réseau. En d'autres termes, toutes les faces cristallines doivent intercepter les atomes et les molécules qui composent les points du réseau. **Une face se développe plus préférentiellement dans un cristal si elle croise un nombre important de points du réseau.** Ce postulat est connu sous le nom de **loi de Bravais**.

Par exemple, dans le réseau plan de la figure 4, les faces seront plus communes si elles se développent le long du réseau plan noté 1, plus ou moins communes si elles se développent le long du réseau noté 2, et de moins en moins communes si elles se développent le long des plans notés 3,4 et 5.

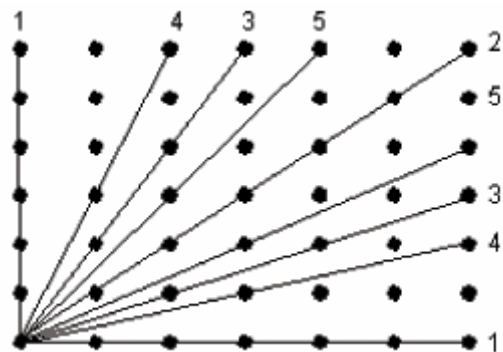
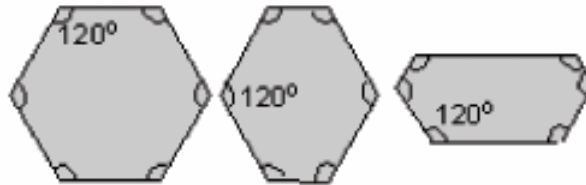


Figure 4 : Exemple d'un réseau cristallin

- Les cristaux d'une même espèce peuvent prendre des formes très diverses suivant le nombre et les dimensions de leurs faces, **mais ces faces font entre elles toujours le même angle dièdre**. (loi de la constance des angles dièdres, énoncée en 1669 par Nicolas Sténon). Dans la figure 5, les angles entre les faces de cristaux de quartz de morphologie différente demeurent les mêmes ( $120^\circ$ ).



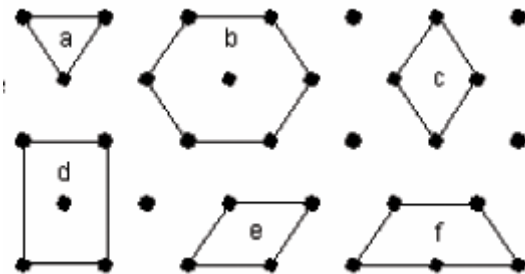
**Figure 5 :** Cristaux de quartz de morphologie différente

#### 4.5. La maille simple

Etant donné la structure régulière de l'édifice cristallin, pour caractériser un réseau, il suffit de considérer une figure géométrique simple qui reproduit tout le réseau par translation. Cette figure est appelée **maille**. On voit donc que l'on peut découper le réseau en mailles, la maille étant la plus petite portion du réseau ayant les mêmes symétries que le réseau lui-même. Une maille est donc un prisme composé de plusieurs noeuds ; le réseau est un empilement de mailles élémentaires.

Même si le choix d'une maille est arbitraire, il est commun de choisir la plus petite maille qui met en évidence la symétrie du réseau.

Par exemple, dans le réseau rectangulaire de la figure 6, il y'a 6 choix possibles pour définir une maille (notés de a à f). Le réseau possède un axe de symétrie d'ordre 2 qui est perpendiculaire à la page. Puisque le réseau ne possède pas d'axe de symétrie d'ordre 3 ou d'ordre 6, le choix des mailles a et b est rejeté. Le choix de la maille f est à éliminer car il représente la moitié de la maille b. Les mailles c et e ne décrivent pas complètement la symétrie du réseau. Donc il est préférable dans cet exemple de caractériser le réseau par la maille d dans laquelle apparaissent les éléments de symétrie de l'ensemble.



**Figure 6 :** Exemples de mailles

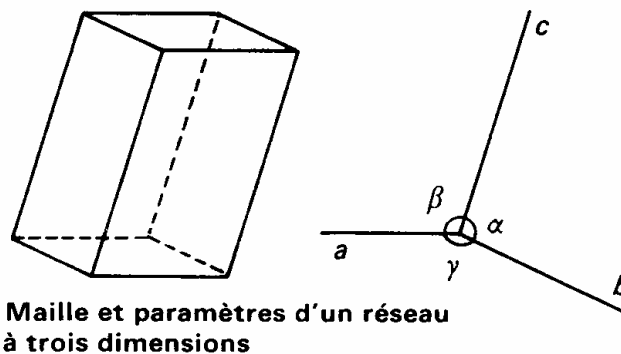
On remarque d'après l'exemple précédent que la maille n'est pas toujours la figure la plus simple du réseau. Ainsi, les mailles a, c, e et f sont dites *primitive* (Une maille est dite **primitive** (P) si les noeuds ne se trouvent qu'aux sommets de la maille). Les mailles b et d sont dites non-primitive ou **multiple** (dans ce cas, un noeud se trouve à l'intérieur de la maille, la maille est appelée aussi *centrée*). Donc le réseau de cet exemple a été caractérisé par une maille multiple.

Dans l'espace, la maille est un parallélépipède. On distingue quatre types de mailles selon la disposition des atomes (et donc des noeuds du réseau) dans la maille (tableau 1) :

Disposition des atomes dans le parallélépipède	Nom de la maille
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aux huit sommets seulement</li> <li>- Aux huit sommets et au centre</li> <li>- Aux huit sommets et au centre des faces</li> <li>- Aux huit sommets et aux centres de deux faces parallèles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Simple ou primitive (P)</li> <li>- Centrée (I)</li> <li>- À faces centrées (F)</li> <li>- À bases centrées (C)</li> </ul>

**Tableau 1** : Différents types de mailles

On décrit une maille d'un solide donné - et par conséquent un réseau donné - par ses **paramètres**. On appelle ainsi l'ensemble des trois côtés  $a$ ,  $b$  et  $c$  du parallélépipède et des trois angles  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ , situés entre ces trois côtés (figure ci-dessous).



**Figure 7** : Maille et paramètres d'un réseau à trois dimensions

Les 7 systèmes cristallins peuvent ainsi être décrits par leurs paramètres :

- Système triclinique :  $a \neq b \neq c$  ;  $\alpha \neq \beta \neq \gamma$
- Système monoclinique :  $a \neq b \neq c$  ;  $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$
- Système orthorhombique :  $a \neq b \neq c$  ;  $\alpha = \gamma = \beta = 90^\circ$
- Système hexagonal :  $a = b \neq c$  ;  $\alpha = \beta = 90^\circ$  ;  $\gamma = 120^\circ$
- Système rhomboédrique :  $a = b = c$  ;  $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$  ;  $\alpha < 120^\circ$
- Système quadratique :  $a = b \neq c$  ;  $\alpha = \gamma = \beta = 90^\circ$
- Système cubique :  $a = b = c$  ;  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$

#### 4.6. Les 14 réseaux de Bravais

Les types de réseaux à trois dimensions ont été dérivés par Bravais en 1848. Il a trouvé qu'il existe 14 réseaux spatiaux dans les 7 systèmes cristallins (tableau 2).

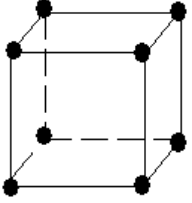
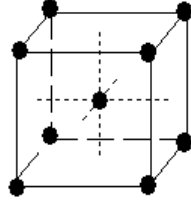
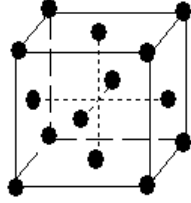
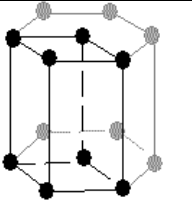
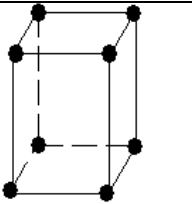
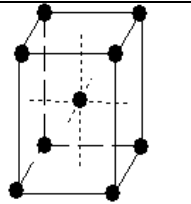
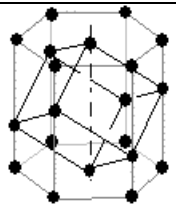
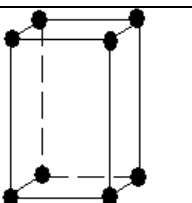
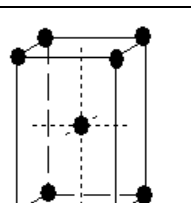
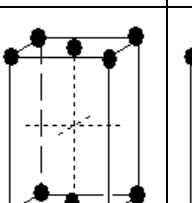
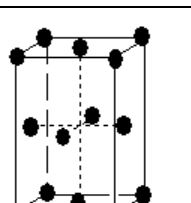
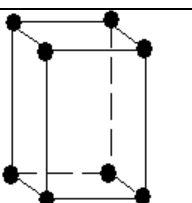
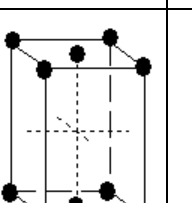
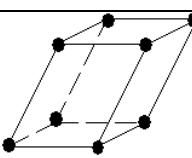
Système	Simple (P)	Centré (I)	À 2 faces centrées (C)	À faces centrées (F)	Structure rhomboédrique (R)
Cubique					
Hexagonal					
Quadratique					
Rhomboédrique					
Orthorhombique					
Monoclinique					
Triclinique					

Tableau 2 : les 14 réseaux de Bravais

- Aux types de mailles qu'on vient de décrire il faut ajouter la structure rhomboédrique (R) : dans le cas de la symétrie trigonale (ou rhomboédrique), on peut avoir les motifs disposés en rhomboèdre au sein d'une maille hexagonale ; en plus des 12 noeuds aux sommets du prisme à base hexagonale, on a des noeuds situés sur les segments parallèles à l'axe.

#### 4.7. Conclusion

Il existe sept systèmes cristallins correspondant aux sept systèmes de mailles du réseau. Dans les sept systèmes cristallins, il existe 14 types de réseaux à trois dimensions (tous les solides cristallins peuvent être décrits par des mailles qui appartiennent à ces 14 types). Les caractéristiques des sept systèmes cristallins (dimensions de la maille et éléments de symétrie) ainsi que les réseaux qui leurs correspondent sont donnés dans le tableau 3.

Système cristallin	Dimension de la maille	Symétrie essentielle	Réseaux de Bravais
<b>Triclinique</b>	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$	aucune	P
<b>Monoclinique</b>	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	1 seul axe d'ordre 2	P, C
<b>Orthorhombique</b>	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = \beta = 90^\circ$	Plusieurs axes d'ordre 2	P, C, I, F
<b>Quadratique</b>	$a = b \neq c$ $\alpha = \gamma = \beta = 90^\circ$	1 axe d'ordre 4	P, I
<b>Cubique</b>	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	4 axes de rotation d'ordre 3	P, I, F
<b>Rhomboédrique</b>	$a = b = c$ $\alpha < 120^\circ$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	1 axe de rotation d'ordre 3	R (rhomboédrique)
<b>Hexagonal</b>	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$	1 axe de rotation d'ordre 6	P

**Tableau 3** : paramètres et différents types de réseaux possibles des 7 systèmes cristallins

La combinaison des éléments de symétrie a permis de définir 32 classes cristallines. Chaque maille peut être rangée dans l'une des 32 classes cristallines. En plaçant cette maille dans un réseau infini, il apparaît alors des éléments de symétrie avec translation et des axes hélicoïdaux (Un axe hélicoïdal implique une translation d'un point associée à une rotation de 60°, 90°, 120° ou 180°). La combinaison des 32 classes cristallines et des 14 réseaux de Bravais produit l'ensemble complet des groupes spatiaux à trois dimensions:

**14 réseaux de Bravais + 32 classes cristallines → 230 groupes spatiaux à trois dimensions.**

Le groupe spatial est la subdivision ultime dans la classification de la symétrie des solides cristallins. Chaque groupe spatial est associé à une classe cristalline qui appartient à un des 7 systèmes cristallins (triclinique, monoclinique, orthorhombique, quadratique, cubique, rhomboédrique et hexagonal). Tous les matériaux cristallins possèdent une structure qui appartient à un de ces 230 groupes spatiaux.