

# Introduction

## Définition du cristal et du minéral

### Définition du cristal

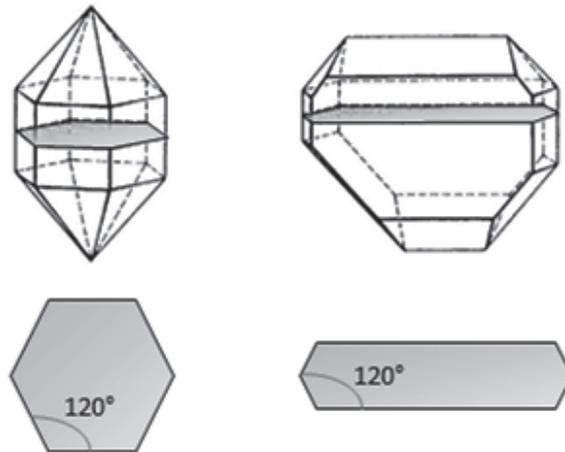
Les états de la matière sont classés en trois catégories : l'état gazeux, l'état liquide et l'état solide. Un corps peut passer à l'état solide de multiples manières, en fonction des conditions physico-chimiques du milieu. Par exemple, une solution saturée abandonnée au refroidissement permet la croissance de *cristaux terminés par des faces planes*.

Ces faces planes semblent être la caractéristique essentielle des cristaux, mais elles ne sont en réalité qu'un des nombreuses manifestations de l'arrangement périodique des cristaux, à l'échelle atomique. Un cristal brisé, même s'il ne présente plus ses faces caractéristiques, possède encore cette *structure interne particulière*, qui peut être mise en évidence par une série de propriétés géométriques, optiques, thermiques, électriques, magnétiques, ainsi que par diffraction des rayons X.

Une autre propriété essentielle des cristaux est leur *homogénéité*. Cette homogénéité se caractérise par une composition chimique et des propriétés physiques constantes au sein d'un même cristal, à l'échelle *macroscopique et microscopique*. Toutefois, à l'échelle atomique (par exemple lorsque le cristal est observé par la technique de diffraction des rayons X, dont la longueur d'onde est de l'ordre de grandeur de l'Ångström =  $10^{-10}$  m), cette homogénéité disparaît, car les cristaux montrent alors une structure interne discontinue. Cette *structure est caractérisée par un arrangement régulier des atomes ou des molécules*, alors qu'un corps amorphe, même s'il montre une homogénéité à l'échelle microscopique, ne présente pas de distribution atomique régulière.

Un cristal de composition déterminée peut, selon les conditions physico-chimiques du milieu au sein duquel il cristallise, se présenter sous *des formes polyédriques différentes*. Avant le XVI<sup>ème</sup> siècle, ces cristaux étaient considérés comme des caprices de la nature, mais leur examen morphologique a conduit très tôt les minéralogistes à essayer d'établir des lois pour mieux comprendre les relations entre les faces cristallines. Ainsi, Nicolas Sténon (ou Steno ; 1638-1686) démontra, en 1669, que des cristaux de la même espèce, qui se différencient par leur aspect extérieur (nombre et longueur des côtés), sont limités par des faces qui forment entre elles deux à deux des angles égaux dans

tous les individus examinés. Cette loi, confirmée par Romé de l'Isle en 1772, est connue sous le nom de *loi de constance des angles*.



*Illustration de la loi de constance des angles. Les cristaux de quartz déformés ou non déformés présentent sans distinction des angles de 120° entre leurs faces.*

Une première définition du cristal, basée sur les observations macroscopiques et microscopiques, peut ainsi être proposée :

**Un cristal est un corps solide chimiquement homogène, partiellement ou complètement délimité par des faces planes. Les angles entre ces faces sont constants pour les cristaux d'une même espèce.**

Cette définition simplifiée sera évidemment modifiée tout au long de l'exposé qui va suivre, en tenant compte notamment des observations nouvelles fournies par la diffraction des rayons X.

## Définition du minéral

Au cours des processus qui ont conduit à la formation de la Terre, des planètes telluriques, des astéroïdes et des météorites, les substances qui composent ces corps ont subi un refroidissement progressif. Ce refroidissement a permis la cristallisation de minéraux. Sur une planète géologiquement active comme la Terre, des processus géologiques variés, comme par exemple le magmatisme, le métamorphisme, l'hydrothermalisme et l'altération météorique, aboutissent également à la formation de minéraux néoformés. Dans certaines météorites, au

contraire, les minéraux ont cristallisé très tôt au cours de l'histoire du système solaire, et n'ont pas subi de modification ultérieure significative.

Voici par conséquent la définition du minéral :

**Un minéral est un solide inorganique cristallin de composition chimique définie, qui résulte de processus cosmologiques ou géologiques.**

Il existe toutefois des exceptions à cette définition :

- Tous les minéraux ne sont pas solides. Le mercure est le seul exemple de minéral liquide à température ambiante.
- Tous les minéraux ne sont pas inorganiques. Il existe une classe de minéraux organiques, regroupant certaines espèces comme l'ambre, notamment.
- Tous les minéraux ne sont pas cristallins. L'opale est un exemple bien connu de minéral amorphe.
- Tous les minéraux ne résultent pas de processus cosmologiques ou géologiques. Ainsi, les bio-minéraux sont formés grâce à l'intervention de bactéries ou d'organismes vivants. La whewellite et la struvite, par exemple, sont des minéraux constitutifs des calculs rénaux.

A ce jour, les *composés anthropogéniques ne sont pas considérés comme des minéraux*. Ainsi, des phases secondaires, formées sur les terrils suite à l'exploitation d'une mine, par exemple, ne sont pas des minéraux. La limite reste toutefois assez floue entre les composés anthropogéniques, qui ne sont pas des minéraux, et les bio-minéraux produits par d'autres organismes vivants.

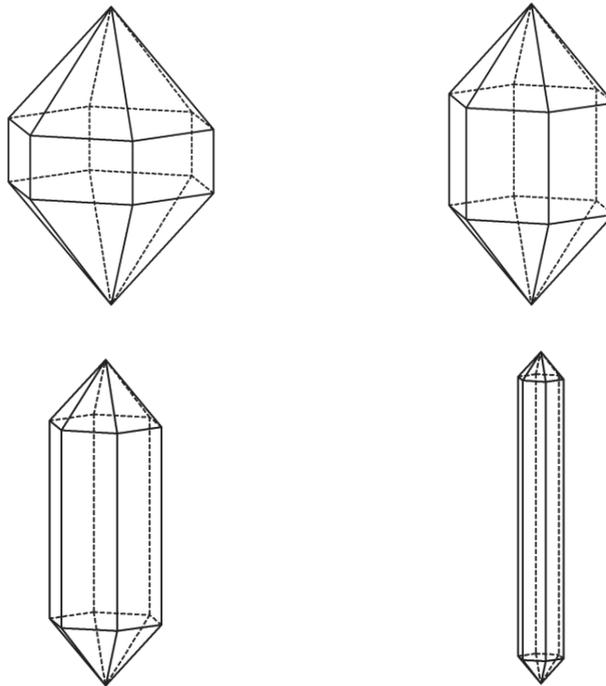
# Chapitre I

## Cristallographie géométrique

### Comprendre la forme externe des cristaux

#### 1. La symétrie cristalline

Comme l'a montré Nicolas Sténon, les cristaux d'une même espèce sont susceptibles de montrer des variations morphologiques importantes, tout en préservant les relations angulaires qui existent entre leurs faces. Ce ne sont pas les positions effectives des faces qui caractérisent un cristal, mais bien les orientations de ces faces. Ces variations morphologiques sont liées au développement relatif des faces cristallines ; ceci implique qu'une face particulièrement développée sur un individu peut complètement disparaître sur un autre cristal. Les variations du développement relatif des faces cristallines provoquent une variation du *faciès des cristaux* (Fig. I.1).



*Figure I.1. Variation du faciès de cristaux de quartz, caractérisés par des faces d'orientations identiques.*

L'étude des cristaux naturels et synthétiques a montré que les faces cristallines étaient le témoin de la symétrie interne des cristaux. Nous allons voir comment caractériser la *symétrie cristalline* à l'échelle macroscopique.

### 1.1. Opérations et éléments de symétrie

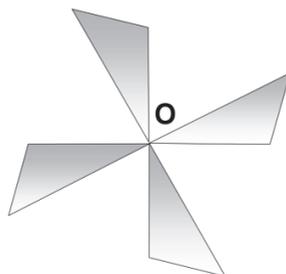
Une *opération de symétrie* est un mouvement d'un corps tel qu'après l'exécution de ce mouvement, chaque point du corps coïncide avec un point équivalent (ou peut-être le même point) du corps dans sa position initiale. En d'autres termes, si nous notons la position et l'orientation d'un corps avant et après l'exécution d'un mouvement, ce mouvement est une opération de symétrie si ces deux positions et orientations ne peuvent pas être distinguées. Une autre façon de définir une opération de symétrie est de dire qu'elle doit avoir pour effet de placer le corps dans une *configuration équivalente*, c'est-à-dire une configuration qui ne se distingue pas de la configuration initiale bien qu'elle ne soit pas nécessairement identique.

Un *élément de symétrie* est une entité géométrique (*point, droite, plan*) par rapport à laquelle peut s'effectuer une ou plusieurs opérations de symétrie. Les éléments de symétrie sont étroitement liés aux opérations de symétrie, car l'opération ne peut se définir que par rapport à l'élément, et en même temps, l'existence d'éléments de symétrie ne peut être démontrée qu'en réalisant l'opération de symétrie appropriée. L'existence de l'élément dépend de l'existence de l'opération ou des opérations, et vice versa. Il est important de souligner que *l'élément de symétrie reste invariant* lors de l'opération.

Nous allons maintenant décrire les différents éléments de symétrie que l'on peut rencontrer dans les cristaux.

#### 1.1.1. Les axes de rotation

Les axes de rotation sont des *droites*, et l'opération de symétrie qui leur est associée est la *rotation*. Ils peuvent être illustrés en considérant le cas des figures planes. Comme le montre la Figure I.2, une rotation de  $90^\circ$ , autour d'un axe perpendiculaire en O au plan du dessin, restitue une position que l'on ne peut distinguer de la position originelle du dessin. Une figure qui coïncide avec la figure de départ est également restituée après une rotation de  $180^\circ$  et  $270^\circ$  et  $360^\circ$ . Cette figure est par conséquent symétrique, et est caractérisée par la présence de l'axe de symétrie autour duquel les rotations s'effectuent.

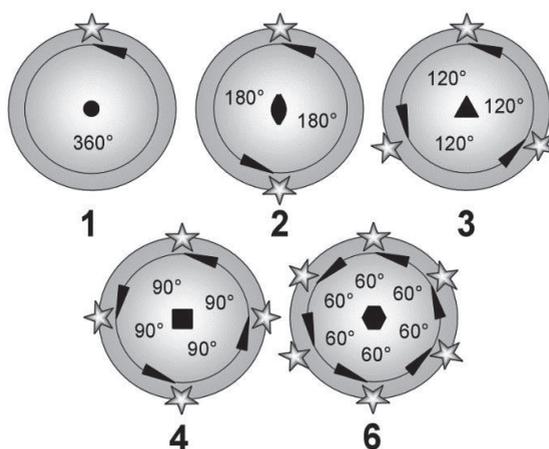


**Figure I.2.** L'axe de rotation appliqué à une figure plane.

En fonction de l'angle minimal qui assure la restitution (ici  $90^\circ$ ), on peut définir l'ordre de l'axe de rotation. Cet ordre correspond au nombre de rotations successives à appliquer pour restituer une position identique à celle de départ. Dans le cas de la Figure I.2, quatre rotations successives de  $90^\circ$  sont nécessaires pour restituer la position originelle ; l'axe de symétrie est donc d'ordre 4. De manière plus générale, l'ordre de symétrie  $n$  peut être défini comme :

$$\text{Angle minimal de restitution} = \frac{360}{n}$$

L'axe d'ordre 1 correspond à l'opération appelée identité, car elle implique une rotation de  $360^\circ$  et équivaut à une absence de symétrie. L'axe d'ordre 2 provoque la coïncidence après une rotation de  $180^\circ$ , l'axe d'ordre 3 après  $120^\circ$ , l'axe d'ordre 4 après  $90^\circ$ , l'axe d'ordre 5 après  $72^\circ$ , et l'axe d'ordre 6 après  $60^\circ$ . Ces rotations sont illustrées à la Figure I.3. Les axes de symétrie se représentent par un chiffre qui correspond à l'ordre de l'axe : 1, 2, 3, 4, 6.



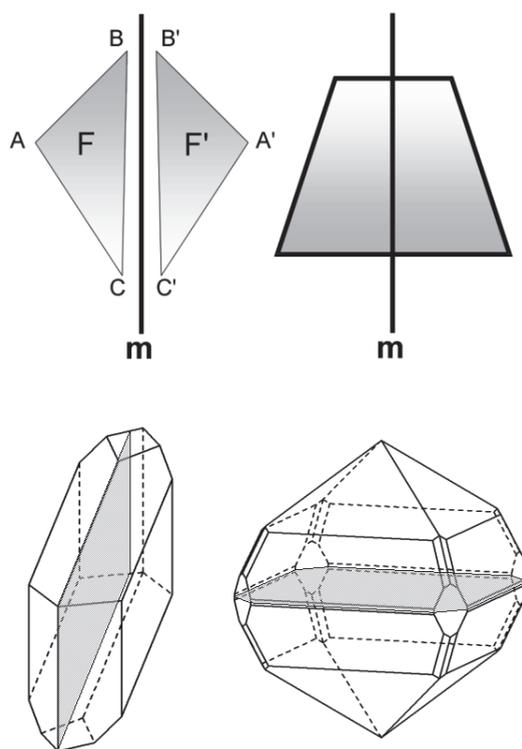
**Figure I.3.** Les axes de symétrie et leurs symboles.

Remarque : L'axe d'ordre 5 n'est pas représenté sur la Figure I.3. car il est absent des cristaux, pour une raison que nous démontrerons dans la suite de cet ouvrage.

### 1.1.2. Le plan de symétrie

Le plan de symétrie, aussi appelé plan miroir, est un *plan* ayant pour opération de symétrie associée la *réflexion*. Dans l'exemple de la Figure I.4, le plan miroir  $m$  transforme la figure  $F$  en son image  $F'$ . Pour tracer le symétrique d'une figure par rapport à un plan miroir, il faut abaisser, à partir de chaque point de la figure, une perpendiculaire au plan miroir et la prolonger d'une longueur égale.

Comme on le voit sur la Figure I.4, il est impossible de superposer  $F$  à  $F'$  : ces figures sont appelées *énantiomorphes*. Comme nous l'avons vu plus haut, la rotation, au contraire, produit des figures superposables : celles-ci sont qualifiées de *congruentes*. Le plan de symétrie est représenté par la notation «  $m$  ».



**Figure I.4.** Le plan de symétrie.

### 1.1.3. Le centre de symétrie

Lorsque l'on envisage la symétrie des figures finies à trois dimensions ou des polyèdres, on doit faire appel à de nouveaux éléments et à de nouvelles opérations de symétrie. Parmi ces éléments, il y a le centre de symétrie, qui est un *point* ayant pour opération de symétrie associée *l'inversion*. Pour obtenir le symétrique d'une figure par rapport à un point C, on joint chaque point de la figure à C et l'on prolonge la droite obtenue d'une longueur égale (Fig. I.5).

Les objets (polyèdres, molécules) produits par inversion sont *énantiomorphes*. La notation du centre de symétrie est «  $\bar{1}$  » (voir ci-dessous), mais le symbole « C » est également utilisé.

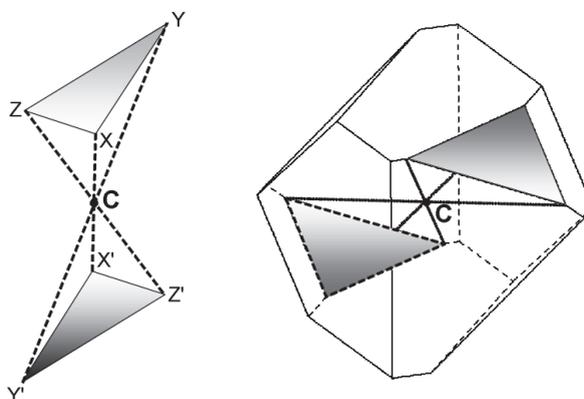


Figure I.5. Le centre de symétrie.

### 1.1.4. Les axes d'inversion

De nouveaux éléments de symétrie, qui apparaissent également lorsque l'on considère les figures à trois dimensions, sont les axes d'inversion. Ces éléments de symétrie sont des *droites*, et l'opération de symétrie associée est composée : il s'agit d'une *rotation suivie d'une inversion*. Les notations des axes d'inversion sont :  $\bar{1}$ ,  $\bar{2}$ ,  $\bar{3}$ ,  $\bar{4}$ ,  $\bar{6}$ .

Comme nous allons le voir, ces éléments de symétrie ne sont pas tous nouveaux, car leurs effets sont parfois équivalents à ceux produits par d'autres éléments de symétrie existants. Ainsi, la Figure I.6 montre clairement que l'axe d'inversion  $\bar{1}$  est équivalent à un centre de symétrie. Ceci s'explique facilement puisqu'un axe de rotation d'ordre 1 provoque une rotation de  $360^\circ$ , et restitue ainsi une position  $(x y z)$  identique à celle d'origine. L'inversion s'effectue