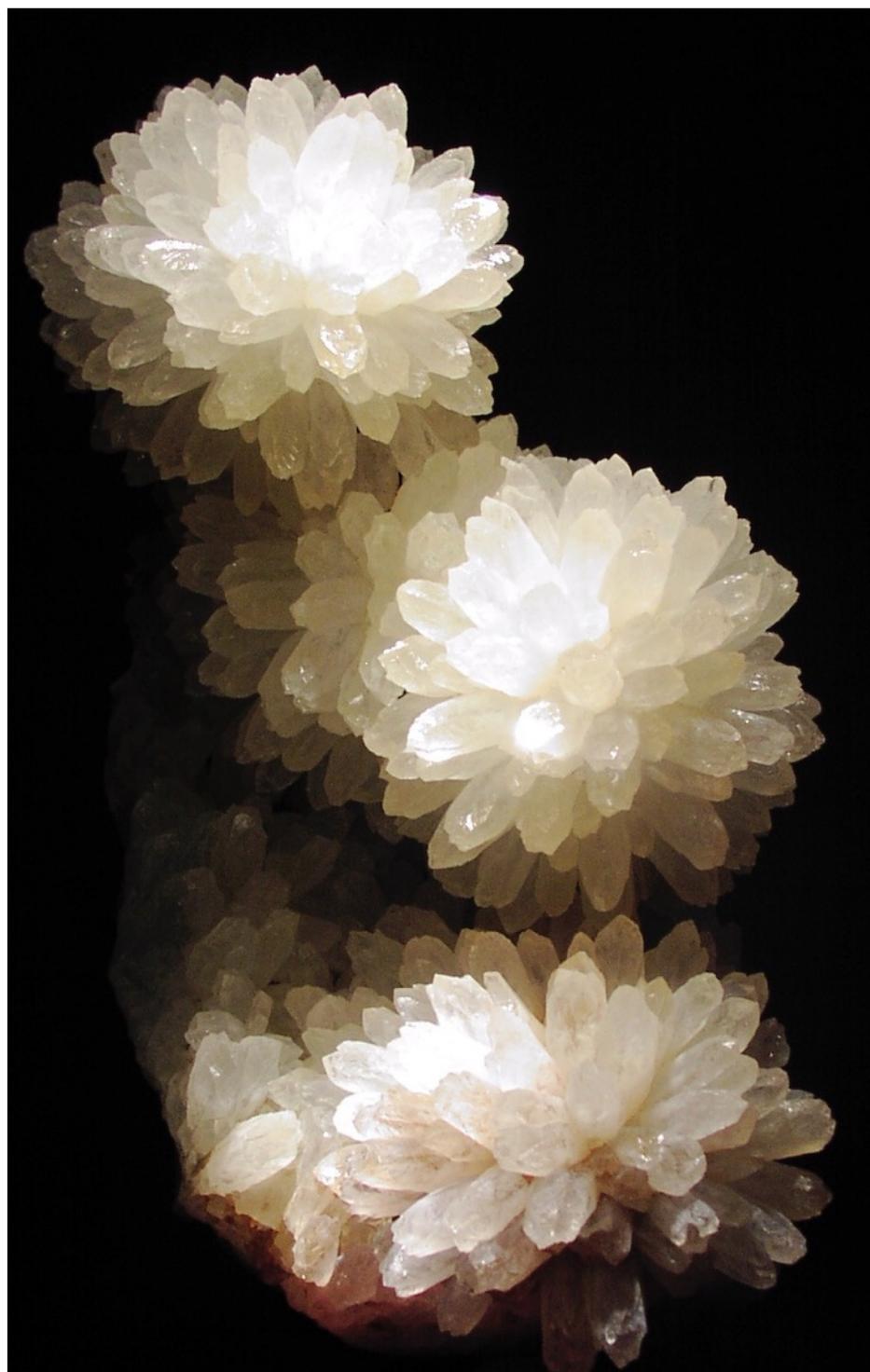


Au cœur des minéraux

Jacques Deferne et Nora Engel



Chefs d'oeuvres de la nature, par leurs formes géométriques, les cristaux reflètent l'arrangement périodique des atomes qui les constituent.

Cette phrase résume à elle seule tout le champ d'étude de la cristallographie. Cette discipline décrit les relations étroites qui relient les formes des cristaux et leurs propriétés physiques avec la façon dont les atomes s'arrangent dans l'intimité de leur architecture.

Cet ouvrage est destiné aussi bien aux étudiants en géologie qui abordent l'étude de la minéralogie qu'aux amateurs de minéraux qui voudraient élargir leurs connaissances scientifiques au-delà du simple plaisir de contempler un beau cristal.

La cristallographie est une discipline abstraite dont l'étude conduit vite à des formulations mathématiques compliquées. Dans cet ouvrage, nous nous sommes efforcés de recourir le moins possible aux raisonnements purement mathématiques et avons choisi une approche empirique des phénomènes.

Le contenu de ce livre résume tout ce qu'un étudiant en géologie devrait connaître avant d'aborder l'étude de la cristallographie, de l'optique cristalline et de la minéralogie descriptive.

C'est dans un souci de clarté que la nomenclature utilisée ici a été choisie. Après avoir assimilé la théorie contenue dans cet ouvrage, les lecteurs qui voudraient approfondir davantage la cristallographie pourront alors adopter sans difficulté les abréviations internationales en usage dans la littérature anglophone.

Plan de l'ouvrage :

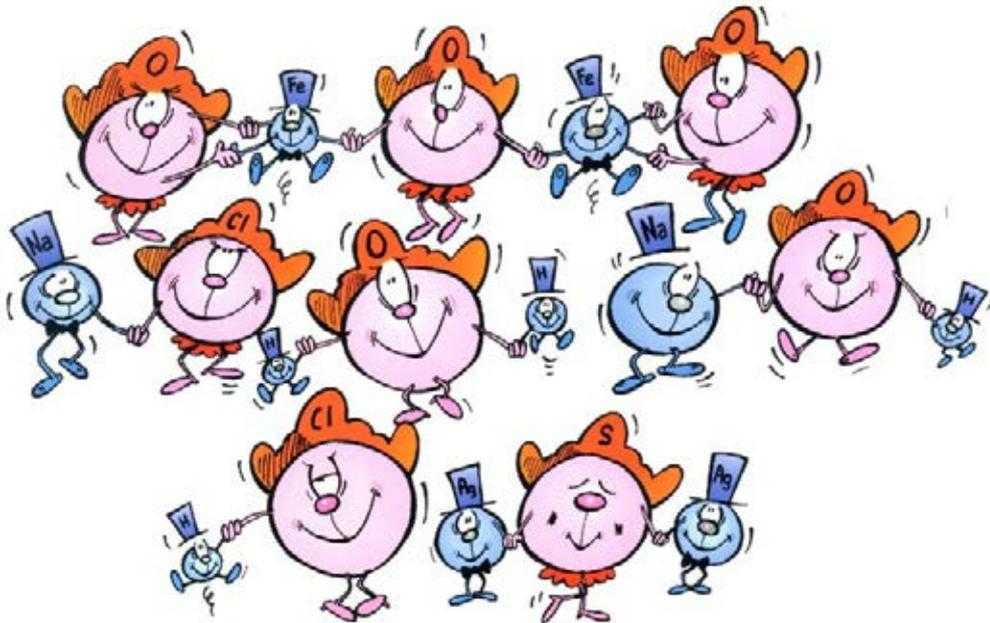
<i>Un peu de cristallographie</i>	3
<i>Les minéraux sont constitués d'atomes</i>	19
<i>Aspects et propriétés des minéraux</i>	29
<i>Les minéraux dans leur environnement</i>	43
<i>Comment identifier les minéraux</i>	57
<i>Comment collectionner les minéraux</i>	65
<i>Suggestion pour un début de collection</i>	69
<i>Description de quelques minéraux</i>	70
<i>Glossaire</i>	102

Un peu de cristallographie

Les minéraux sont constitués d'atomes

Si, comme Gulliver, nous pouvions diminuer de taille jusqu'au point de nous promener à l'intérieur d'un minéral, nous verrions un empilement de sphères plus ou moins volumineuses, les plus petites prenant place dans les interstices laissés libres par les plus grosses. Ce sont des atomes. Ils ont des poids, des volumes et des propriétés chimiques très différents les uns des autres.

Par ailleurs, ces atomes sont très divers : pour certains minéraux ce sont des atomes de chlore et de sodium, pour d'autres de soufre et de fer ou, pour d'autres encore, de calcium, de carbone et d'oxygène. Ces combinaisons d'atomes, caractéristiques pour chaque minéral, constituent la *composition chimique*.



Pour plus de détails, consultez, du même auteur, la fiction amusante «Le Monde étrange des Atomes»

Les atomes sont très divers

On compte environ 90 sortes d'atomes différents dans la nature. On les appelle aussi *éléments chimiques*. Certains sont très abondants, d'autres très rares. Dans la croûte terrestre continentale, soit dans les trente kilomètres environ qui se trouvent sous nos pieds, une dizaine d'éléments constituent à eux seuls 99.3 % parmi tous les éléments du tableau périodique. Ce sont eux qui, par leurs diverses combinaisons, constituent les minéraux des roches. Par ordre d'abondance décroissante, on trouve l'oxygène, le silicium, l'aluminium, l'hydrogène, le sodium, le calcium, le fer, le magnésium, le potassium et le titane.

Les atomes sont très disciplinés

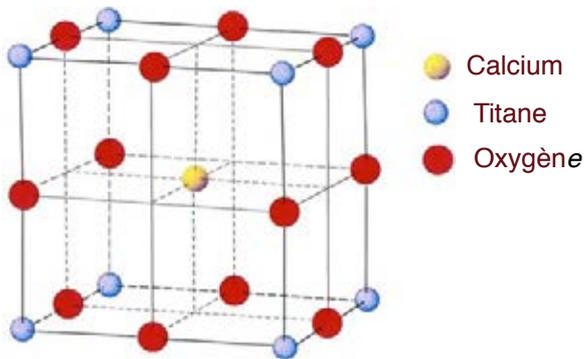
À l'intérieur de chaque espèce minérale, les atomes adoptent un arrangement géométrique parfaitement ordonné. Les plus gros s'arrangent de manière à remplir l'espace le mieux possible, les plus petits occupent les interstices laissés libres entre les plus gros.

Les minéraux sont donc caractérisés par la façon dont les atomes sont arrangés dans leur intimité profonde. Cet arrangement géométrique parfait qui se prolonge indéfiniment dans toutes les directions de l'espace constitue ce que les minéralogistes nomment *la structure cristalline*.

Pour chaque espèce minérale, la façon dont sont disposés les atomes à l'intérieur de la structure a pour effet de définir l'orientation et le développement des faces des cristaux. Grâce aux techniques de la diffraction des rayons X, on peut aujourd'hui déterminer la structure atomique de chaque espèce minérale.

Par exemple, la structure de la pérowskite (CaTiO_3) peut être décrite de la manière suivante :

- Les atomes de titane (Ti) sont situés aux sommets d'un cube imaginaire de 3.8 \AA^1 d'arête.
- L'atome de calcium (Ca) est situé au centre du cube.
- Les atomes d'oxygène (O) occupent le milieu des arêtes.



*Pérowskite, Val Malenco, Italie,
(photo Fernando Metelli)*

Comment décrire la structure d'un minéral ?

La structure de la pérowskite s'étend indéfiniment dans les trois directions de l'espace par juxtaposition successive de cubes élémentaires. La structure est alors complètement décrite lorsqu'on a défini :

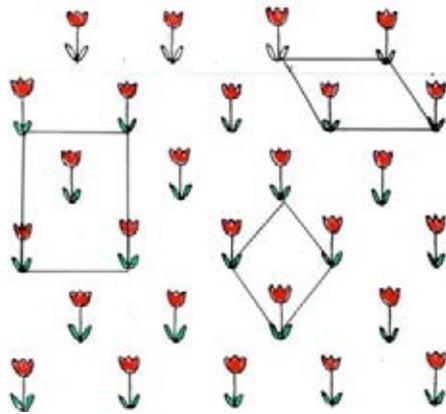
- *le motif*, c'est-à-dire le plus petit groupement d'atomes qui, indéfiniment répété dans les trois directions de l'espace, constitue le minéral,
- *la maille élémentaire*, le parallélépipède qui, par juxtaposition successive dans les trois directions de l'espace, construit le minéral dans son entier.

La maille élémentaire définit en fait le schéma de répétition du motif. Dans le cas de la pérowskite, la maille élémentaire est un cube de 3.8 \AA d'arête. C'est donc un parallélépipède dont il faut, pour chaque espèce minérale, déterminer la longueur des arêtes ainsi que les angles que celles-ci forment entre elles. Définir le motif revient alors à décrire les positions des atomes à l'intérieur de la maille élémentaire.

¹[Å] est le symbole de l'Ångström qui vaut un dix millionième de mm.

Comme sur un papier peint

On peut comparer une structure cristalline à un papier peint. On observe un motif décoratif indéfiniment répété par translation d'une maille élémentaire qui se résume, dans le plan, à un parallélogramme, un losange, un carré ou un rectangle, sur toute l'étendue de la paroi.



Description d'un papier peint :

par analogie, on a un motif, ici une fleur, répété sur toute la paroi par juxtaposition d'une maille élémentaire, soit un rectangle, un losange ou un parallélogramme.

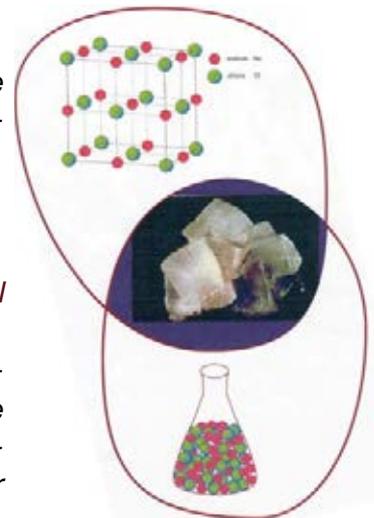
La notion d'espèce minérale

La notion d'espèce minérale n'est pas du tout comparable à celle d'espèce animale ou végétale. Elle repose uniquement sur deux entités qui sont :

- la composition chimique d'une part,
- la structure cristalline d'autre part.

Halite, NaCl

Le minéral est alors parfaitement décrit lorsqu'on connaît sa composition chimique et sa structure cristalline. L'étude de la minéralogie fait donc appel à la chimie qui permet d'établir la composition chimique du minéral et à la cristallographie qui permet d'en déterminer la structure intime.

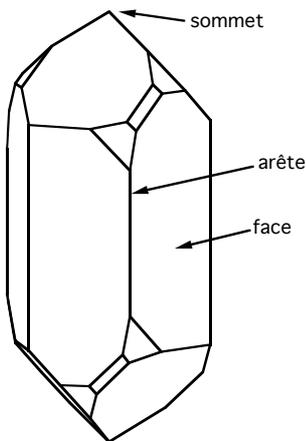


L'état cristallin

L'état cristallin n'est pas uniquement restreint aux beaux cristaux des collectionneurs, mais il s'étend aussi à la presque totalité des substances solides du règne minéral, en particulier aux minéraux constitutifs des roches et aux métaux. Les cristaux parfaitement bien développés sont rares. Pour les obtenir, il faut que leur croissance ait lieu dans un milieu libre de toutes contraintes, dans un liquide par exemple, sans que leur développement soit limité par l'obstacle d'autres minéraux en voie de formation.

Par opposition à l'état cristallin, on distingue l'état amorphe dans lequel les atomes ne sont pas ordonnés. L'état amorphe ne concerne guère que les verres et certaines matières plastiques. Il est dû à une consolidation hâtive qui n'a pas laissé aux atomes le temps de s'arranger de manière ordonnée.

Les cristaux présentent une "certaine symétrie"



Les cristaux bien développés montrent des **faces** planes limitées par des **arêtes** qui, elles-mêmes, convergent vers des **sommets**. En observant attentivement les cristaux, on constate qu'ils présentent une "certaine symétrie".

Ce terme de symétrie recouvre en fait une discipline abstraite qui relève des lois de la géométrie.

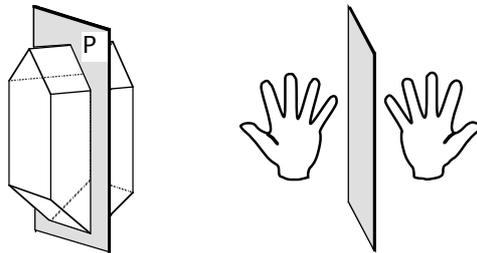
Comme toute géométrie, il y a des théorèmes et des démonstrations. Il s'agit de lois de répétitions des éléments d'un objet qui restituent cet objet dans son intégralité.

Ici l'objet est le cristal et les éléments sont une face, une arête ou un sommet. Ces répétitions sont effectuées par des opérateurs de symétrie dont les principaux sont :

- plan de symétrie,
- l'axe de symétrie
- le centre d'inversion (ou centre de symétrie)

Le plan de symétrie est un miroir

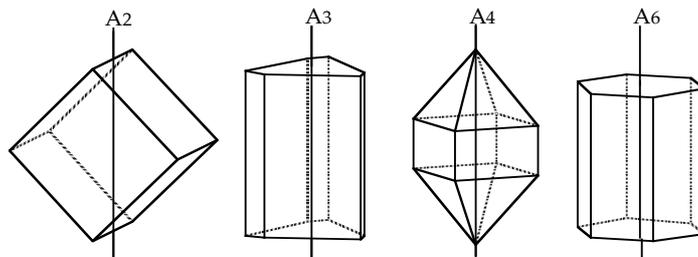
C'est un plan qui caractérise les symétries bilatérales. Il dédouble les éléments d'un objet, agissant comme un miroir. Toutes les faces, arêtes et sommets d'un cristal retrouvent une image identique, **mais non superposable**, de l'autre côté du plan. Ainsi la main droite aura l'air d'une main gauche vue dans le miroir.



Les axes de symétrie : comme un carrousel

Ici, toutes les faces, arêtes et sommets sont comme "répétés" par rotation autour d'un axe.

Au cours d'une rotation complète (360°), chaque élément est répété 2, 3, 4 ou 6 fois, suivant l'ordre de l'axe. On appelle donc **l'ordre de l'axe** le nombre de fois que cet axe répète l'objet au cours d'une rotation complète. Dans les cristaux, il n'existe que des axes d'ordre 2, 3, 4 et 6.

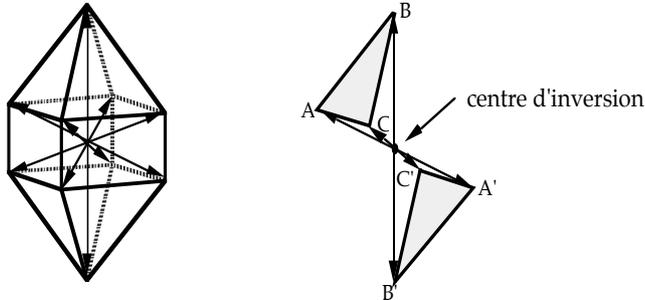


Axes de rotation d'ordre 2, 3, 4 et 6

Le centre d'inversion est l'ami des parallélépipèdes¹

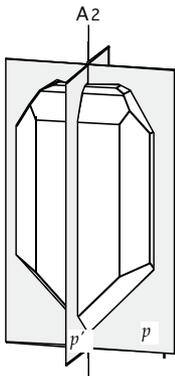
Toutes les faces d'une forme cristalline sont reproductibles deux à deux par inversion de leurs faces, de leurs sommets et de leurs arêtes par rapport à un centre d'inversion appelé parfois *centre de symétrie*.

Toutes les faces d'un solide qui possède un centre d'inversion sont parallèles deux à deux. Les parallélépipèdes ont donc tous un centre d'inversion.



Répétition d'une face par le centre d'inversion

Les opérateurs de symétrie aiment à jouer ensemble



Sur un cristal, on n'observe que rarement un seul opérateur de symétrie. Ils s'associent presque toujours à plusieurs pour définir la symétrie du cristal.

Ainsi l'hémimorphite (un silicate de zinc) possède deux plans de symétrie et un axe d'ordre 2 passant par l'intersection des plans.

Quelques rares cristaux n'ont qu'une faible symétrie : un seul axe, un plan, alors que d'autres présentent une symétrie élevée caractérisée par la présence de nombreux opérateurs. Le cube, par exemple, comporte trois axes d'ordre 4, quatre axes d'ordre 3, six axes d'ordre 2, un centre d'inversion et neuf plans de symétrie !

Hémimorphite

La symétrie d'un polyèdre est dite "ponctuelle"

L'ensemble des opérateurs de symétrie d'un cristal constitue sa *formule de symétrie*. Notons encore que tous les opérateurs de symétrie caractérisant la symétrie d'un objet ont un point commun au centre de cet objet. Pour cette raison, on parle de *symétrie ponctuelle*.

La rigueur règne parmi les opérateurs de symétrie

Les combinaisons d'opérateurs de symétrie obéissent à des lois très strictes qui en limitent le nombre. Ce sont les *théorèmes de symétrie*.

Dans le monde minéral, on ne trouve que 32 combinaisons possibles qui définissent ce qu'on appelle les *32 classes de symétrie*. Chaque espèce minérale appartient nécessairement à l'une de ces 32 classes.

¹ Mot horrible qui définit un solide dont toutes les faces sont parallèles deux à deux.

Les sept systèmes cristallins

Les 32 classes de symétrie se répartissent à leur tour en 7 systèmes cristallins, définis chacun par un polyèdre géométrique simple. Toutes les formes des cristaux dérivent de l'un ou l'autre de ces polyèdres par troncatures symétriques de leurs arêtes ou de leurs sommets. Cela signifie que si on opère une troncature sur le sommet d'un cube, celle-ci sera automatiquement répétée sur les autres sommets par les opérateurs de symétrie présents.

Les sept polyèdres qui définissent les sept systèmes cristallins

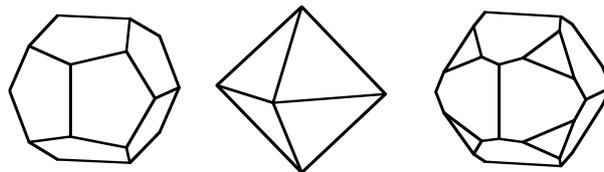


Cubique Quadratique orthorhombique Hexagonal Rhomboédrique Monoclinique Triclinique

Les polyèdres qui définissent ces sept systèmes de symétrie sont respectivement, le cube, le prisme droit à base carrée, le prisme droit à base rectangle (ou losange), le prisme droit à base hexagonale, le rhomboèdre², le prisme oblique incliné dans une seule direction, le prisme oblique incliné dans toutes les directions.

Formes simples et formes composées

Le cube, l'octaèdre, le tétraèdre ou le dodécaèdre sont des formes simples. Mais le plus souvent, les cristaux sont formés de plusieurs formes simples associées : ce sont alors des formes composées. Dans les systèmes à basse symétrie, certaines formes simples ne peuvent exister seules. Ainsi une pyramide à base carrée (une des formes simples du système quadratique) ne peut exister seule. Il faut impérativement lui associer une base pour que la forme soit "fermée". Les minéralogistes appellent *pedion* cette base qui est une face unique dans une position telle qu'elle n'est répétée par aucun opérateur de symétrie.



dodécaèdre octaèdre dodécaèdre + octaèdre
formes simples forme composée

Les formes cristallines du système cubique

Les formes cristallines portent des noms qui dérivent généralement du grec. Les formes appartenant au système cubique ont une nomenclature particulière. Elle est assez simple et se base sur le nombre de faces : tétraèdre, hexaèdre, octaèdre, dodécaèdre etc... On ajoute parfois un qualificatif qui décrit le contour d'une face. Ainsi on distingue le dodécaèdre rhomboïdal du dodécaèdre pentagonal, ces qualificatifs désignant alors le contour de la face³.

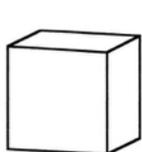
² C'est un polyèdres à six faces parallèles deux à deux, une sorte de cube déformé.

³ Ces qualificatifs précisent le contour de la forme simple. Toutefois, dès qu'on a affaire à des formes composées, le contour de chaque face n'a plus de signification.

Le tableau suivant résume cette nomenclature. Il indique aussi l'orientation de chaque face vis-à-vis des éléments de symétrie propres au cube.

Nomenclature des formes cristallines du système cubique

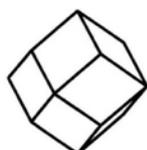
<i>nb. faces</i>	<i>nom de la forme</i>	<i>orientation des faces</i>
6 faces :	<i>cube (ou hexaèdre)</i>	\perp aux axes A4
8 faces :	<i>octaèdre</i>	\perp aux axes A3
12 faces :	<i>dodécaèdre rhomboïdal</i>	\perp aux axes A2
24 faces :	<i>cube pyramidé</i>	parallèle aux axes A4
24 faces :	<i>octaèdre pyramidé</i>	parallèle aux axes A3 (1ère orientation)
24 faces :	<i>trapézoèdre</i>	parallèle aux axes A3 (2ème orientation)
48 faces	<i>hexakisoctaèdre</i>	orientation quelconque



Cube



Octaèdre



Dodécaèdre rhomboïdal



Cube pyramidé



Octaèdre pyramidé

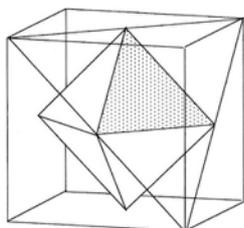


Trapézoèdre

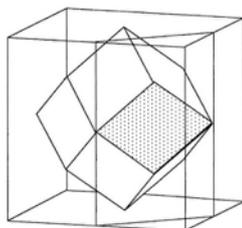


Hexakisoctaèdre

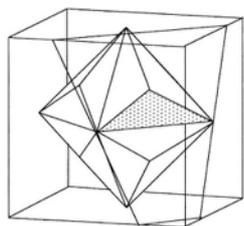
On peut aussi obtenir les formes cristallines du système cubique par troncatures symétriques sur les sommets ou les arêtes d'un cube :



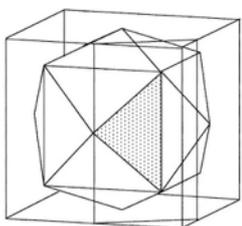
à gauche: octaèdre obtenu par troncature symétrique sur les sommets



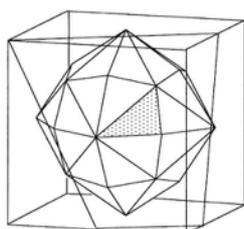
à droite: dodécaèdre rhomboïdal obtenu par troncature symétrique des douze arêtes.



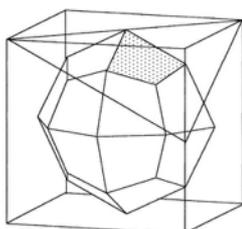
à gauche: triakisoctaèdre ou octaèdre pyramidé, est obtenu par troncature oblique des sommets.



à droite: cube pyramidé obtenu par troncature oblique des arêtes.



à gauche: hexakisoctaèdre obtenu par troncature asymétrique des sommets.



à droite: trapézoèdre obtenu par troncature oblique des sommets.

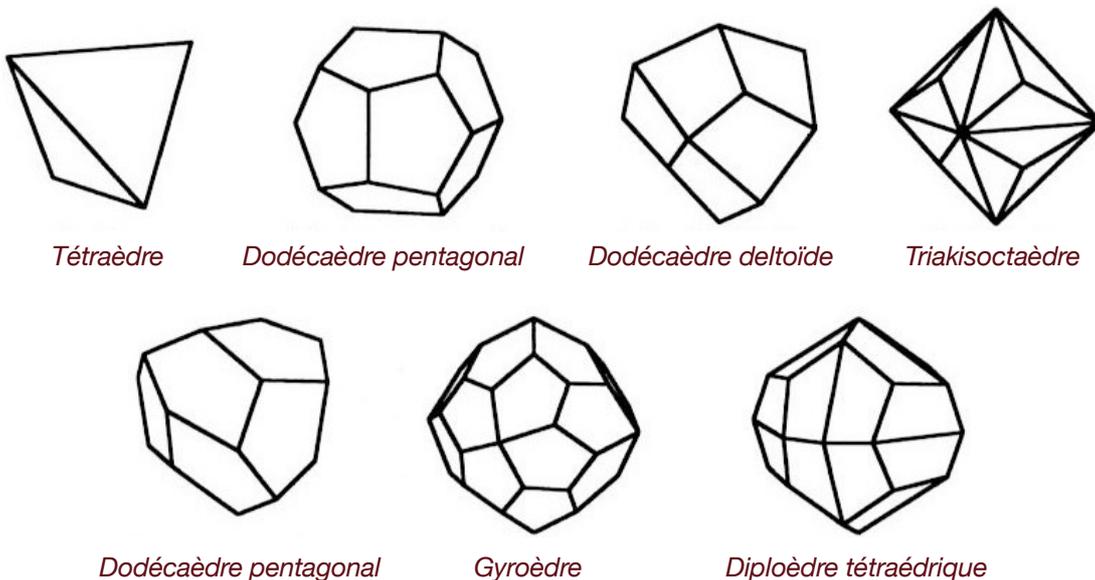
Les formes cristallines décrites ci-dessus obéissent toutes à la totalité des opérateurs de symétrie du système cubique. Les minéralogistes les nomment *holoédries* (qui ont toutes les faces).

On trouve cependant des formes dérivées des précédentes, qui, par diminution du nombre des opérateurs de symétrie, ont perdu une moitié, voire les trois-quarts de leurs faces. Par opposition aux précédentes, on les appelle *mériédries*. Le tableau suivant résume la nomenclature des mériédries du système cubique.

Principales formes cristallines à symétrie cubique incomplète

nombre de faces	nom de la forme	ancienne forme originelle
4 faces	tétraèdre	moitié des faces de l'octaèdre
12 faces	dodécaèdre pentagonal	moitié des faces du cube pyramidé
12 faces	dodécaèdre deltoïde	moitié des faces de l'octaèdre pyramidé
12 faces	triakistétraèdre	moitié des faces du trapézoèdre
12 faces	dodéc. pentag. tétraédrique	quart des faces de l'hexakisoctaèdre
24 faces	gyroèdre	moitié des faces de l'hexakisoctaèdre
24 faces	diploèdre	autre moitié de l'hexakisoctaèdre

Principales formes cristallines à symétrie cubique incomplète

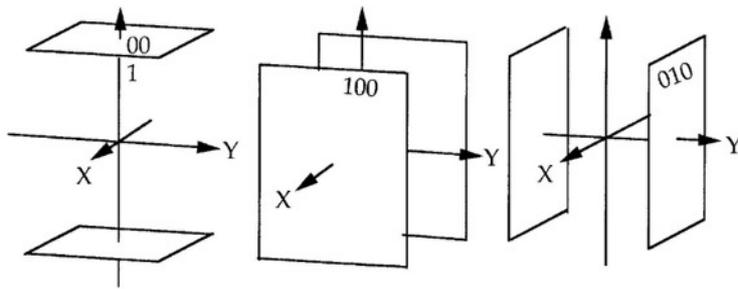


Dans les autres systèmes cristallins

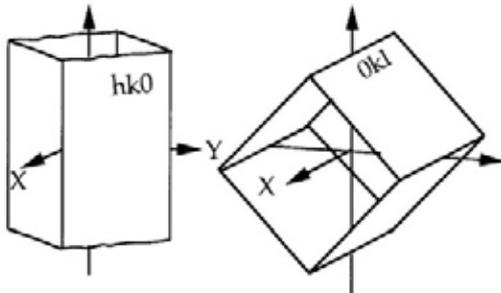
Alors que toutes les formes du système cubique sont "fermées" sur elles-mêmes, certaines formes simples des autres systèmes sont "ouvertes" et ne peuvent exister qu'en combinaison avec une autre forme. Par exemple une pyramide ne peut pas exister sans sa base.

D'une manière générale, un des axes de symétrie joue le rôle d'*axe principal* et sert de référence à l'orientation des faces.

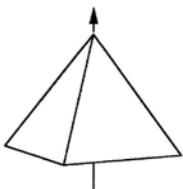
Nomenclature des formes cristallines autres que celles du système cubique



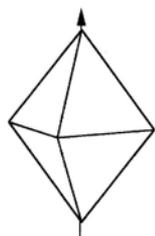
Les pinacoïdes sont constitués de deux faces parallèles.



Les prismes sont un ensemble de faces équivalentes parallèles à un axe principal



Pyramide



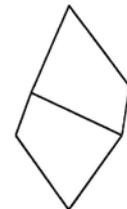
Bipyramide



Sphénoèdre



Disphénoèdre

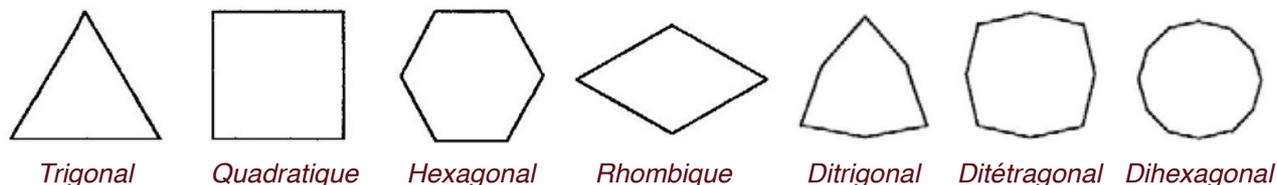


Trapézoèdre

Nomenclature des formes cristallines autres que celles du système cubique

Nom	Description de la forme
Pinacoïde	deux faces parallèles (les bases d'un prisme, par exemple).
Prisme	ensemble de faces équivalentes parallèles à un axe principal.
Pyramide	ensemble de faces équivalentes dont les arêtes convergent vers un sommet situé sur l'axe principal.
Bipyramide	deux pyramides accolées par leur base.
Trapézoèdre	bipyramide dont une a tourné d'un angle quelconque autour de l'axe
Scalénoèdre ditrigonal	bipyramide ditrigonale dont une a tourné de 60° par rapport à l'autre.
Rhomboèdre	trapézoèdre trigonal (ou bipyramide trigonale dont une des pyramides a tourné de 60° par rapport à l'autre). On peut le définir aussi comme un parallélépipède dont les faces ont des formes de rhombe (= losange).
Sphénoèdre	déformation tétragonale ou orthorhombique du tétraèdre.
Pédion	face unique non répétée par les éléments de symétrie.

Les prismes, pyramides et bipyramides sont qualifiés de trigonaux, quadratiques, rhombiques, hexagonaux, ditrigonaux, ditétragonaux ou dihexagonaux suivant le contour de leur section.

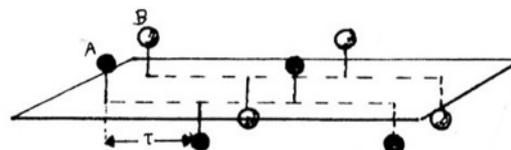


On peut aller plus loin dans la symétrie

Nous n'avons examiné que les problèmes de symétrie ponctuelle, celle où tous les opérateurs de symétrie, plans, axes et centre passent par un point commun. Cette **symétrie ponctuelle** ne s'applique donc qu'à un objet unique, un cristal par exemple. Elle correspond aux **classes de symétrie**.

Si nous reprenons l'exemple du papier peint, les règles de la symétrie ponctuelle ne s'appliquent qu'à chaque motif. Mais si nous voulons décrire l'ensemble de tous les motifs, nous devons ajouter un opérateur de symétrie supplémentaire décrivant **la translation**, opération qui permet de passer d'un motif à l'autre. L'interaction de ce nouvel opérateur sur ceux que nous connaissons déjà entraîne l'apparition de deux nouveaux opérateurs de symétrie : **l'axe hélicoïdal** et **le plan avec glissement**. Les théorèmes de symétrie qui s'appliquent à cet ensemble élargi d'opérateurs ont comme conséquence que la symétrie n'est plus ponctuelle mais **spatiale**.

Les combinaisons d'opérateurs ne sont alors plus limitées aux 32 classes décrites précédemment, mais elles atteignent le nombre élevé de 230 possibilités. Ce sont les **230 groupes d'espace** qui décrivent les rapports géométriques entre tous les atomes d'une structure minérale, c'est-à-dire de sa maille élémentaire et de la manière dont les atomes occupent l'espace à l'intérieur de celle-ci.



Un plan avec glissement

Chaque espèce minérale appartient donc non seulement à l'une des **32 classes de symétrie ponctuelle**, mais encore à l'un des **230 groupes d'espace** qui décrivent les lois de répétition des atomes à l'intérieur de sa structure.

L'identification du groupe d'espace auquel appartient un minéral est une opération difficile qui nécessite l'emploi d'un appareillage complexe.

Espèce minérale et variété

Nous avons vu que la notion d'espèce minérale reposait sur **la composition chimique** d'une part, **la structure cristalline** d'autre part.

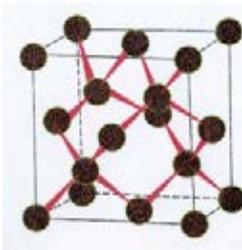
Cette définition n'est pas rigide et, d'un gisement à l'autre, les individus d'une même espèce minérale peuvent montrer une variabilité qui se marque soit par une différence de morphologie ou de couleur, soit encore par une composition chimique légèrement différente. Il s'agit alors d'une **variété**. Ainsi l'améthyste est une variété violette de quartz, l'émeraude une variété transparente verte de béryl, le rubis et le saphir des variétés colorées de corindon, l'adulaire une variété d'orthose caractérisée par une forme particulière.



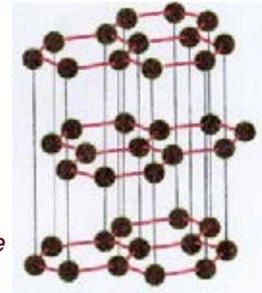
L'Adulaire (à gauche) est une variété d'orthose typique des fissures alpines.

Les atomes ont parfois le choix

Pour une même composition chimique, on peut observer parfois des structures cristallines différentes : c'est le polymorphisme. L'exemple le plus frappant est celui du carbone qui, suivant la façon dont les atomes sont arrangés, peut donner des minéraux aussi différents que le diamant et le graphite. Pour un même composé chimique ce sont les conditions de cristallisation qui déterminent l'apparition d'une structure plutôt qu'une autre. Pour cristalliser dans sa forme cubique, le diamant a besoin d'une pression énorme alors qu'à faible pression le carbone cristallise en graphite.



structure du diamant

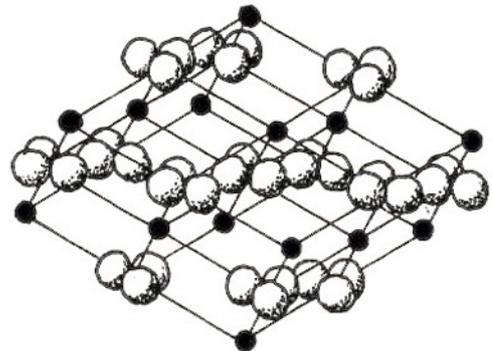


structure du graphite

Polymorphisme du carbone

L'isomorphisme est le phénomène inverse : dans une même structure certains atomes peuvent en remplacer d'autres. Dans le cas de la calcite (CaCO_3), l'atome de calcium peut être remplacé par du magnésium, du fer, du manganèse ou du zinc, donnant respectivement la magnésite (MgCO_3), la sidérite (FeCO_3), la rhodochrosite (MnCO_3), ou la smithsonite (ZnCO_3). Pour que ces remplacements soient possibles, les atomes interchangeables doivent avoir des tailles comparables et des caractéristiques électroniques semblables.

*Exemple d'isomorphisme :
la structure des carbonates rhomboédriques*



On distingue les groupes CO_3 (sphères blanches). Les sites en noir sur le dessin peuvent être occupés par le calcium, le magnésium, le fer, le manganèse ou le zinc.

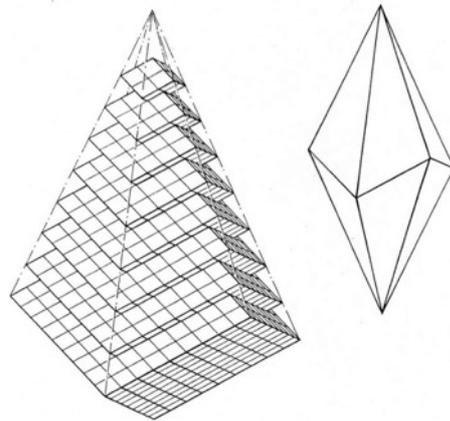
La calcite et l'origine de la cristallographie

La calcite est un minéral fascinant qui présente une très grande diversité de formes. Le point commun de toutes ces formes est leur mode de fragmentation sous un choc. Lorsqu'on casse un cristal de calcite, on obtient, non pas des fragments informes qui rappelleraient le verre brisé, mais des parallélépipèdes qui font penser à des cubes déformés et que les cristallographes nomment rhomboèdres. Ceux-ci se fragmentent eux-mêmes en d'autres rhomboèdres plus petits, aussi loin que le pouvoir séparateur du microscope permet de les observer.

A partir de cette observation, l'abbé René-Just Haüy a imaginé qu'il devait exister une "brique élémentaire" - le rhomboèdre, dans le cas de la calcite - qu'il appela *molécule constituante*. Par empilement de rhomboèdres, selon diverses règles géométriques, il était parvenu à expliquer toutes les formes observées de calcite. Dans son *Essai d'une théorie de la structure des cristaux*, paru en 1784, il définit le terme de structure comme le mode d'arrangement des molécules constituantes.



Calcite, Cumberland, Muséum de Genève



Modèle d'Haüy pour expliquer la forme du scalénoèdre à partir d'empilement de rhomboèdres élémentaires.

En réalité, les minéraux ne sont pas constitués d'un empilement de briques élémentaires au sens où Haüy l'entendait, mais il avait pressenti, sans la découvrir vraiment, l'existence de la maille élémentaire. Cette découverte a été le point de départ de la cristallographie moderne.



L'Abbé René-Just Haüy (1743-1822), professeur de minéralogie au Jardin des Plantes à Paris, père de la cristallographie moderne

Les minéraux ne sont pas toujours bien dans leur peau

Certains minéraux présentent parfois des formes étranges à leur propre symétrie. Ce sont des *pseudomorphoses*. Elles sont dues à la transformation chimique d'une espèce minérale en une autre, sans modification de sa forme extérieure. L'ancienne forme joue en quelque sorte le rôle d'un moule à l'intérieur duquel la transformation s'est effectuée. Des cubes de pyrite, FeS_2 peuvent, par exemple, s'oxyder en goethite, FeO(OH) tout en conservant la forme originelle du cube.

Quelques pseudomorphoses classiques

minéral nouveau	minéral remplacé
quartz	calcite, fluorine, asbeste, talc
goethite	pyrite, sidérite, magnétite
malachite	cuprite, azurite
pyromorphite	galène
talc	quartz

On peut rapprocher ce phénomène de celui de la fossilisation : une ammonite pyritisée peut être considérée comme de la pyrite qui a "emprunté" la forme d'une ammonite. Un cas intéressant est celui de la variété de silice connue sous le nom d'œil-de-tigre qui est le résultat de la silicification plus ou moins complète de la crocidolite, une amiante bleue. C'est du quartz qui a conservé la structure fibreuse de l'amiante. Suivant le degré d'oxydation, les résidus ferreux qui subsistent encore, confèrent à l'œil-de-tigre des teintes brun à jaune doré avec des zones bleuâtres pour les parties les moins oxydées.



Ammonite pyritisée



Talc, pseudomorphose de quartz

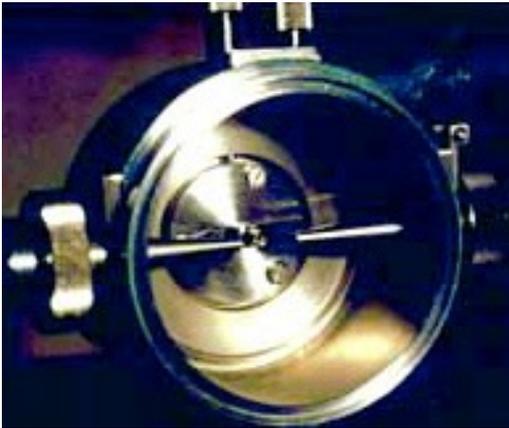


Crocidolite



Oeil-de-tigre

Au cœur de la matière par la diffraction des rayons X



Caméra de diffraction

Découverts en 1885 par W. Röntgen, les rayons X ont permis d'explorer le monde intime des minéraux. Grâce à eux, on a pu déterminer les structures des minéraux, mesurer avec précision les dimensions des mailles élémentaires, déterminer le groupe d'espace auquel ils appartiennent et établir une méthode d'identification des espèces minérales.

Tout comme la lumière, le rayonnement X est de nature électromagnétique. Sa longueur d'onde, beaucoup plus courte que celle du spectre visible, est de l'ordre de grandeur des distances qui séparent les atomes dans les cristaux. Lorsqu'on irradie un cristal avec un rayonnement X, les électrons de tous les atomes du cristal entrent en vibration et chaque atome devient à son tour

une source de rayonnement X, de même longueur d'onde que le rayon incident.

En 1895, l'Allemand W. Röntgen découvre un rayonnement invisible qui rend fluorescentes certaines substances et impressionne les plaques photographiques. Il le baptise rayonnement X. En 1912, un autre savant allemand, M. von Laue établit la nature électromagnétique des rayons X et parvient à en déterminer la longueur d'onde grâce aux interférences obtenues par diffraction à travers un cristal de blende (ZnS). Cette expérience marque une date importante dans l'histoire de la cristallographie et permet le développement rapide d'une nouvelle technique, la **radiocristallographie**.

Ces innombrables émetteurs vont interférer entre eux, renforçant le rayonnement dans certaines directions privilégiées, l'annulant totalement dans les autres directions. Lorsqu'on envoie un rayon X sur un petit agglomérat de poudre très fine d'un minéral, le rayonnement diffracté prend l'aspect d'une série de cônes emboîtés. Le phénomène est tout à fait analogue aux cercles concentriques lumineux que provoquent les bougies de l'arbre de Noël vues à travers la trame très fine des "cheveux d'ange".

Différents modèles de caméra ont été construits pour "photographier" le rayonnement diffracté. Toutes sont conçues selon le même principe. Un film, plaqué contre les parois d'un cylindre plat, enregistre les segments de cônes de diffraction produits par l'échantillon placé au centre de la caméra. Après développement, les segments de cônes apparaissent sur le film sous forme d'une suite de raies d'intensité variable. Cet enregistrement photographique porte le nom de **diagramme de diffraction**.

Comme une "empreinte digitale"

Un diagramme de diffraction constitue, en quelque sorte, "l'empreinte digitale" d'un minéral. En effet, aucun diagramme de diffraction n'est semblable à un autre. Et, de même que la police possède des fichiers d'empreintes digitales des malfaiteurs, de même les minéralogistes utilisent des fichiers de diagrammes de diffraction pour identifier sûrement les minéraux. Cette méthode est intéressante car un seul grain d'un quart de millimètre de diamètre est suffisant pour établir un diagramme de diffraction.

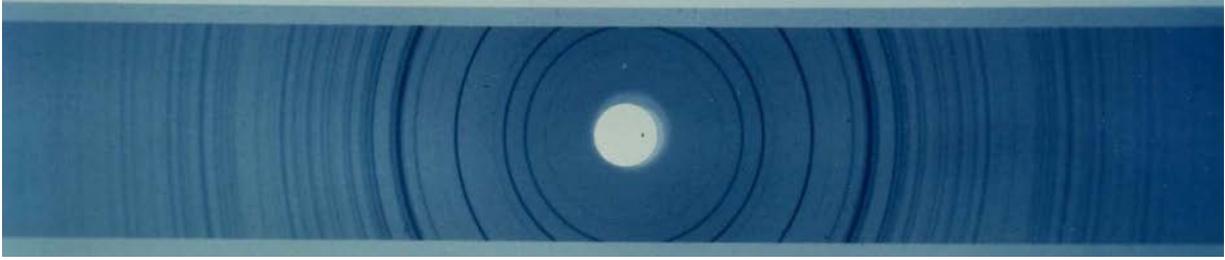


Diagramme de diffraction

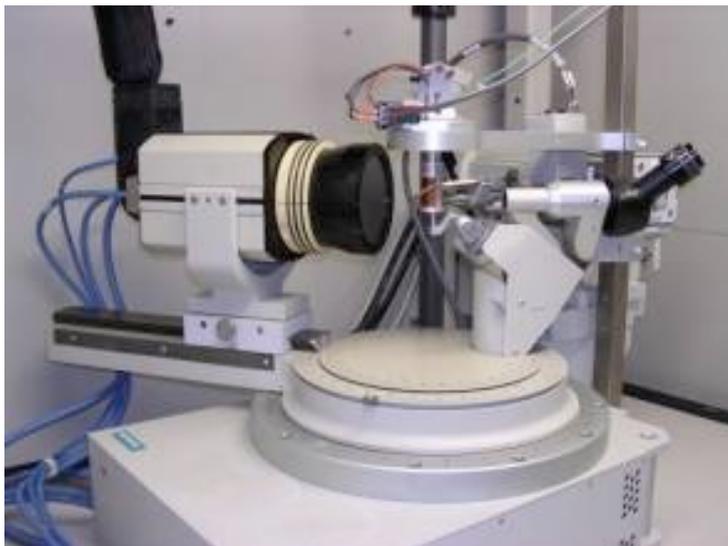
On peut aller encore plus loin

Au-delà de l'identification des minéraux, les rayons X permettent aussi de déterminer les structures atomiques des minéraux. En effet, la position des raies sur un diagramme ne dépend que de la géométrie de la maille élémentaire alors que leur intensité dépend de la nature et de la position des atomes à l'intérieur la maille.

Les rayons X au service de la minéralogie

<i>Élément du diagramme</i>	<i>Renseignements obtenus</i>
<i>position des raies</i>	<i>géométrie de la maille élémentaire</i>
<i>intensité des raies</i>	<i>nature et position des atomes à l'intérieur de la maille.</i>

La détermination de la géométrie de la maille élémentaire ainsi que l'identification du groupe spatial auquel appartient le minéral nécessite des caméras plus sophistiquées que celles nécessaires à la simple détermination d'une espèce minérale. On peut alors déterminer le groupe d'espace du minéral parmi les 230 groupes possibles. Quant à la détermination complète d'une structure cristalline, seuls des laboratoires de radiocristallographie équipés de diffractomètres très perfectionnés peuvent les mener à bien.



Diffractomètre à 4 cercles ENRAF-NONIUS CAD4

*Dernier recensement effectué au Pays des Atomes
(en nombre d'atomes par famille)*

	<i>O</i>	<i>Oxygène</i>	<i>61.5 %</i>
	<i>Si</i>	<i>silicium</i>	<i>20 %</i>
	<i>Al</i>	<i>Aluminium</i>	<i>6 %</i>
	<i>H</i>	<i>Hydrogène</i>	<i>2.8 %</i>
	<i>Na</i>	<i>Sodium</i>	<i>2.3 %</i>
	<i>Ca</i>	<i>Calcium</i>	<i>1.8 %</i>
	<i>Fe</i>	<i>Fer</i>	<i>1.8 %</i>
	<i>Mg</i>	<i>Magnésium</i>	<i>1.7 %</i>
	<i>K</i>	<i>Potassium</i>	<i>1.2 %</i>
	<i>Ti</i>	<i>Titane</i>	<i>0.2 %</i>
		<i>Total :</i>	<i>99.3 %</i>

Les minéraux sont constitués d'atomes

La matière est constituée d'atomes qui s'associent entre eux pour former des composés chimiques. Il y a environ 90 sortes d'atomes dans la croûte terrestre. On les appelle éléments chimiques car ce sont les particules élémentaires⁴ qui constituent la matière qui nous entoure. Certains sont très abondants, d'autres sont beaucoup plus rares.

Abondance des principaux éléments de la croûte terrestre
(en nombre d'atomes)

Elément	Symb	%	Caractères géochimiques
Oxygène	O	60.2	Elément le plus abondant de la croûte terrestre c'est un atome volumineux, porteur de deux charges négatives. Associé à de petits atomes chargés positivement, il constitue les "groupes anioniques" qui caractérisent de nombreuses classes chimiques.
Silicium	Si	20.3	Deuxième en abondance, le silicium apparaît toujours associé à l'oxygène avec lequel il constitue le quartz et participe à l'important groupe des silicates.
Aluminium	Al	6.2	L'aluminium est un élément important qui joue un rôle double : il apparaît dans les minéraux comme cation indépendant d'une part et peut aussi, d'autre part, remplacer partiellement le silicium dans la structure de certains silicates.
Hydrogène	H	2.9	C'est le plus léger de tous les atomes. On le trouve lié à l'oxygène sous la forme de groupes hydroxyles [OH] ou sous forme d'eau H ₂ O.
Sodium	Na	2.5	Abondant dans les feldspaths, il occupe une place importante dans les océans auxquels il confère leur salinité (NaCl).
Calcium	Ca	1.9	Présent dans presque toutes les classes minérales : fluorures, carbonates, sulfates, phosphates, silicates. Constituant important des calcaires.
Fer	Fe	1.9	Omniprésent dans presque toutes les classes de minéraux.
Magnésium	Mg	1.8	Sous forme de carbonate et associé au calcium, il forme les roches dolomitiques. Mais c'est dans les silicates qu'il est abondant, comme son jumeau le fer, avec lequel il forme les silicates "ferromagnésiens".
Potassium	K	1.3	Atome volumineux qu'on trouve surtout dans les feldspaths et les micas.
Titane	Ti	0.2	N'existe pratiquement que sous forme d'oxyde.
Autres éléments		0.7	Ne jouent aucun rôle majeur dans la croûte terrestre.

On voit que dix éléments composent à eux seuls 99.3 % des atomes de la croûte terrestre. Tous les autres éléments se partagent le 0.7 % restant.

Comme les atomes ont des poids et des volumes très différents les uns des autres, les pourcentages de leur abondance changent suivant qu'on exprime les proportions relatives des éléments, en poids, en volume ou en nombre d'atomes.

⁴ Ces particules ne sont élémentaires qu'à l'échelle des chimistes. En effet, on sait que les atomes sont constitués de particules plus petites, protons, neutrons, électrons. Les neutrons et les protons sont eux-mêmes constitués de particules encore plus petites, les quarks.

La croûte terrestre est principalement constituée d'oxygène !

Dans le tableau ci-dessus nous avons choisi ici de comparer leur abondance en nombre d'atomes car, dans les formules chimiques, ce sont des proportions de nombres d'atomes qui sont exprimées. On remarque immédiatement l'importance de l'oxygène : dans la croûte terrestre il y a plus d'atomes d'oxygène que tous les autres atomes réunis. Nous verrons plus loin le rôle que joue cet élément dans la constitution des minéraux. En simplifiant à l'extrême, on peut considérer la croûte terrestre comme un immense assemblage compact de volumineux atomes d'oxygène entre les interstices desquels prennent place tous les autres atomes !

Les atomes s'organisent en rangs serrés

Dans les minéraux, pour des questions d'économie de place, les atomes s'assemblent en remplissant le mieux possible l'espace disponible. Les atomes les plus volumineux tendent donc à réaliser des **assemblages compacts** : ces gros atomes se disposent en couches dans lesquelles chaque atome est entouré de six autres, comme dans les structures dites en "nids d'abeilles". Puis les couches s'empilent les unes sur les autres de telle manière que chaque atome se place au-dessus de l'interstice situé entre trois atomes de la couche inférieure.

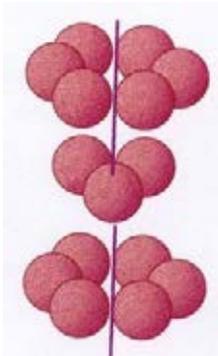


Assemblage compact d'oranges :

On remarque que chaque orange est entourée de six interstices alors que chaque interstice n'est entouré que de trois oranges. Il y a donc deux fois plus d'interstices que d'oranges.

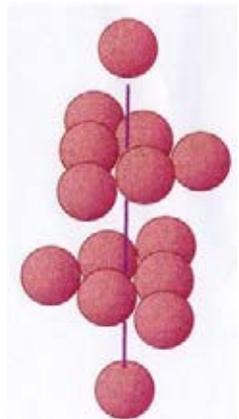
On peut les empiler de deux manières différentes

Comme il y a deux fois plus d'interstices que d'atomes (3 atomes autour de chaque interstice, 6 interstices autour de chaque atome), il existe deux possibilités d'empilement qui aboutissent chacune à un type d'assemblage compact particulier qui occupe 74 % de l'espace total. Ce sont l'assemblage **hexagonal compact** et l'assemblage **cubique compact**



Assemblage hexagonal compact, caractérisé par l'alternance A-B-A-B

Assemblage cubique compact, caractérisé par l'alternance A-B-C-A-B-C.



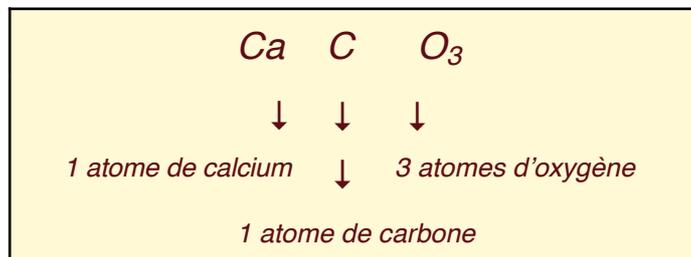
Il existe un troisième type d'assemblage. Il s'agit de la structure du type tungstène à l'intérieur de laquelle chaque atome est entouré de huit autres situés au sommets d'un cube. L'assemblage n'est plus tout à fait compact et le taux de remplissage n'est plus que de 68 %. Il s'agit de l'**assemblage cubique centré**.



L'Atomium de Bruxelles, un modèle d'assemblage cubique centré.

Comment lire une formule chimique

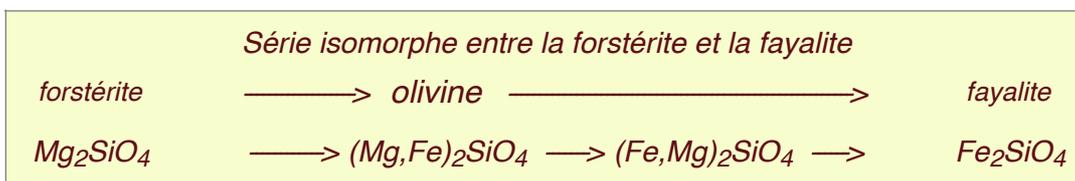
La formule chimique a pour but de présenter, sous une forme abrégée, les proportions, en nombres d'atomes, des différents éléments qui entrent dans la composition du minéral. La convention veut qu'on aligne les symboles chimiques des éléments présents, affecté chacun d'un nombre placé en indice qui indique les proportions relatives de chacun d'eux. L'absence de nombre correspond à 1. Dans l'exemple du quartz, la formule SiO_2 indique qu'il y a deux fois plus d'atomes d'oxygène que de silicium. De même, la formule de la calcite, CaCO_3 , montre que pour cinq atomes, il y a un atome de calcium, un de carbone et trois d'oxygène.



Certains atomes peuvent échanger leur place

A l'intérieur d'une formule chimique, certains atomes métalliques (les cations) sont parfois inclus dans une parenthèse. Cette dernière correspond généralement à un site particulier dans la structure cristalline, site où les atomes placés dans la parenthèse peuvent se remplacer mutuellement, souvent en toutes proportions. On place conventionnellement ces atomes dans un ordre d'abondance décroissante. Le nombre total d'atomes correspond à l'indice dont est affectée la parenthèse. Lorsque le remplacement peut exister en toutes proportions on parle alors de *série isomorphe* ou de *cristaux mixtes*.

Dans l'exemple ci-dessous, Mg et Fe peuvent se substituer l'un l'autre en toutes proportions dans le minéral, pour autant qu'il y ait globalement deux atomes pour chaque tétraèdre SiO_4 .



Le remplacement d'un élément par un autre dans un même site structural est à l'origine des **cristaux mixtes**, issus de la cristallisation en toutes proportions d'un mélange de deux termes extrêmes. On parle alors de **série isomorphe**.

L'ordre des symboles dans la parenthèse indique que c'est le magnésium qui prédomine sur le fer. Si on avait écrit $(\text{Fe}, \text{Mg})_2$, cela aurait signifié une prédominance du fer sur le magnésium.

Anions et groupes anioniques

Dans la nature, les atomes sont généralement **ionisés**. Cela signifie qu'ils sont porteurs d'une ou plusieurs charges électriques. On les appelle **cations** lorsque ces charges sont positives, **anions** lorsqu'elles sont négatives.

Il n'y a que peu d'atomes qui soient de véritables anions. Ce sont l'oxygène (O), le chlore (Cl), le fluor (F), le soufre (S), l'arsenic (As), l'antimoine (Sb), plus rarement l'iode (I), et le brome (Br). Il faut noter encore que certains d'entre eux, notamment le soufre et l'arsenic, peuvent figurer également comme cation dans certains édifices cristallins.



De gauche à droite: Messieurs Sodium, Calcium, Aluminium, des cations et Mesdames Oxygène, Fluor et Chlore, des anions.
(tiré du Monde étrange des Atomes).

Le point de vue des chimistes

Les chimistes distinguent principalement trois types de liaisons entre les atomes: **ionique**, **covalente** et **métallique**. Dans les liaisons de type **ionique**, il y a échange d'électrons entre les anions et les cations. Les atomes s'empilent les uns sur les autres, formant des assemblages à l'intérieur desquels les anions grossissent en se chargeant d'électrons provenant des cations qui, eux, voient leur taille diminuer. Les gros anions constituent des assemblages compacts et les petits cations se logent dans les interstices. Les liaisons ioniques interviennent pour une grande part dans les structures des minéraux. Dans les liaisons **covalentes**, les atomes se partagent équitablement leurs électrons. On ne parle alors plus d'anions ni de cations.

Les structures à liaisons **métalliques** caractérisent les métaux. On observe une mise en commun aléatoire de tous les électrons. Les assemblages d'atomes sont assimilés à des empilements de sphères. Les électrons peuvent se déplacer sous l'influence d'une "pompe à électrons" (batterie, dynamo, alternateur) et engendrer ainsi un courant électrique.

La réalité est plus nuancée, et rares sont les minéraux caractérisés par un seul type de liaison. Le plus souvent un type de liaison prédomine sur les autres.

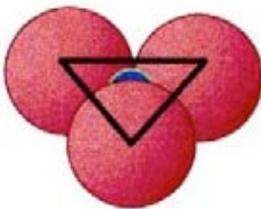
L'oxygène règne sur l'organisation des atomes

L'oxygène tient une place très importante. En plus de son rôle d'anion simple dans la classe des oxydes, il se lie fortement à divers atomes métalliques pour former des **groupes anioniques**, sortes de "briques négatives" pourvues d'une configuration géométrique particulière.

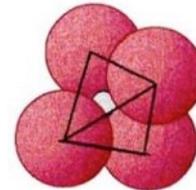
Le groupe anionique $[\text{CO}_3]$, par exemple, est constitué d'un tout petit atome de carbone situé dans l'interstice laissé libre entre trois gros atomes d'oxygène. Il est à la base de la classe des carbonates.

Le groupe $[\text{SiO}_4]$ est formé d'un petit atome de silicium logé entre 4 atomes d'oxygène disposés jointivement aux 4 sommets d'un tétraèdre imaginaire. On parle alors du **tétraèdre** $[\text{SiO}_4]$ qui caractérise les silicates. Le tétraèdre est un modèle fréquent et les groupes anioniques qui sont très souvent de ce type, tels les tétraèdres $[\text{PO}_4]$ ou $[\text{SO}_4]$ qui caractérisent les phosphates et les sulfates.

La charge électrique négative d'un groupe anionique doit être compensée par des atomes chargés positivement, **les cations**, afin que la charge globale du minéral soit nulle. On voit parfois les groupes anioniques affectés d'un indice négatif, $[\text{CO}_3]^{2-}$, $[\text{SiO}_4]^{4-}$, $[\text{PO}_4]^{3-}$. Cet indice correspond au nombre de charges électriques négatives dont ils sont porteurs et qui devront être compensées par les charges positives des cations avec lesquels ces anions seront associés.



Le groupe $[\text{CO}_3]^{2-}$ comporte un excès de deux charges négatives.



Le groupe $[\text{SiO}_4]^{4-}$ comporte un excès de 4 charges négatives.

Les groupes anioniques, eux aussi, sont généralement placés entre parenthèses⁵ afin que le lecteur puisse plus facilement l'identifier. Lorsque le groupe anionique est multiple, on préfère écrire $[\text{PO}_4]_3$, indiquant qu'il y a trois fois le groupe $[\text{PO}_4]$, plutôt que $[\text{P}_3\text{O}_{12}]$. Lorsqu'il n'y a aucune ambiguïté possible, on peut supprimer la parenthèse.

Analyse de la formule de l'apatite : $\text{Ca}_5 [\text{PO}_4]_3 [\text{F}, \text{Cl}, \text{OH}]$

Ca_5	$[\text{PO}_4]_3$	$[\text{F}, \text{Cl}, \text{OH}]$
↑	↑	↑
Calcium: 5 atomes métalliques, porteurs chacun de 2 charges positives.	3 groupes anioniques $[\text{PO}_4]$ montrant qu'il s'agit d'un phosphate. Chacun est porteur de 3 charges négatives.	Site dans la structure pouvant être occupé indifféremment par F, Cl ou OH, chacun porteur d'une charge négative.

Les dentistes préfèrent la fluor-apatite

L'apatite est le principal constituant des dents. Mais c'est la fluor-apatite que les dentistes préfèrent car elle résiste mieux aux agents chimiques que la chlor- ou l'hydroxyle-apatite. C'est pour cela qu'ils recommandent la prise de fluor au cours de la croissance des dents afin que celles-ci résistent mieux à la carie dentaire.

⁵ Par souci de clarté, nous plaçons les groupes anioniques entre parenthèses crochets.

On voit souvent apparaître les anions Cl, F ainsi que le groupe hydroxyle [OH] dans une même parenthèse : [OH,Cl,F]. Ces termes peuvent se substituer les uns aux autres. Cette substitution est fréquente car ils ont à peu près la même taille et sont tous trois porteurs d'une seule charge négative.

Dans le cas de l'apatite, $\text{Ca}_5[\text{PO}_4]_3 [\text{F},\text{Cl},\text{OH}]$, on distingue trois variétés soit la fluor-apatite, la chlore-apatite ou l'hydroxyle-apatite, suivant que [F], [Cl] ou [OH] prédomine sur les deux autres.

Parfois, un même élément peut apparaître deux fois dans une même formule chimique. C'est le cas dans la formule de la muscovite, $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}][\text{OH}]_2$. Cela signifie que certains atomes d'Al se substituent aux atomes de Si à raison d'un atome sur quatre dans le groupe anionique [Al-Si₃O₁₀] alors que l'autre Al participe à l'édifice cristallin en qualité de cation dans un autre site structural.

Le principe de la classification des minéraux

Nous avons vu plus haut que la notion d'espèce minérale reposait sur deux entités complémentaires qui sont la composition chimique d'une part, la structure cristalline d'autre part. Toute classification doit donc prendre en considération ces deux critères.

Développée parallèlement par divers auteurs, la classification actuelle est fondée sur une première division en classes chimiques, puis sur des subdivisions basées sur la proportion cations/anions ou sur des critères moins universels, comme des structures très semblables ou de grandes similitudes dans les propriétés chimiques ou physiques. Si le schéma des classes chimiques est à peu près universellement adopté par tous, des divergences subsistent encore au niveau des subdivisions et des groupes. Les pays germaniques utilisent habituellement la classification dite Klockmann-Ramdohr-Strunz⁶ alors que les anglo-saxons préfèrent celle établie par D. Dana (1837-1892) et ses successeurs Charles Palache, Harry Berman et Clifford Frondel⁷. Les Russes, de leur côté, utilisent la classification proposée par A.S. Povarennykh⁸ & Kostov. Comme ce petit ouvrage ne s'adresse ni à des cristallographes, ni à des minéralogistes professionnels, nous avons adopté une classification simplifiée, inspirée de ces divers auteurs.

Les classes chimiques

Les grandes subdivisions sont établies à partir de la composition chimique, plus précisément sur le type d'anion ou de groupe anionique de la formule chimique.

Ainsi par exemple, la calcite, CaCO_3 , fait partie de la classe des carbonates caractérisée par le groupe anionique [CO₃], alors que l'anhydrite, CaSO_4 , appartient à celle des sulfates caractérisée par le groupe [SO₄]. Le tableau ci-contre montre les grandes divisions de la classification universellement adoptée, avec les principaux groupes anioniques qui les caractérisent.

Quelques classes ne comptent que très peu d'espèces. On les associe habituellement à d'autres classes avec lesquelles elles présentent des affinités chimiques ou structurales. Ainsi les molybdates, les wolframates et les chromates sont habituellement classés avec les sulfates, alors que les arsénates, les vanadates sont classés avec les phosphates, les nitrates avec les carbonates etc.

⁶ Hugo Strunz: *Mineralogische Tabellen*, Akad. Verlag Geest & Portig, Leipzig.

⁷ Palache, Berman et Frondel: *Danas's System of Mineralogy*, John Wiley, New-York.

⁸ A.S. Povarennykh & I. Kostov: *Crystal Chemical Classification of Minerals*, Plenum Press, New-York, London, 1972.

À l'intérieur des classes chimiques

Le second critère de classification est moins universel. Basé en partie sur des subdivisions chimiques et sur des affinités structurales, il permet d'établir des groupes à l'intérieur des grandes classes chimiques. Par exemple, dans la classe des carbonates, on peut distinguer les **carbonates rhomboédriques**, les **carbonates orthorhombiques** ou encore les **carbonates basiques**⁹, selon qu'ils cristallisent dans le système rhomboédrique, orthorhombique ou qu'ils renferment le groupe anionique supplémentaire [OH].

De même, dans la classe des sulfates, on distingue les sulfates anhydres, les sulfates hydratés et les sulfates basiques, selon qu'ils renferment ou non de l'eau ou qu'ils contiennent le groupe [OH].

Classification systématique des minéraux

Classe	Anions ou groupes anioniques
I. Minéraux dépourvus d'oxygène	
Éléments natifs	Minéraux constitués que d'un seul élément.
Halogénures	[Cl] ¹⁻ , [F] ¹⁻ , plus rarement [I] ¹⁻ et [Br] ¹⁻ .
Sulfures	[S] ²⁻ , comprend aussi [As] ³⁻ , [Sb] ³⁻ , [Se] ²⁻ , [Te] ²⁻ .
Sulfosels	[AsS ₃] ³⁻ , [SbS ₃] ³⁻ , [AsS ₄], [SbS ₄], [As ₄ S ₁₃], etc..
II. Minéraux oxygénés, non silicatés	
Oxydes & hydroxydes	[O] ²⁻ , [OH] ¹⁻ , comprend aussi [Nb ₂ O ₆] ²⁻ , [Ta ₂ O ₆] ²⁻
Carbonates	[CO ₃] ²⁻ , comprend aussi [NO ₃] ¹⁻ .
Borates	[BO ₃] ³⁻ , [B ₂ O ₅] ⁴⁻ , [B ₇ O ₁₃] ⁵⁻ , etc..
Sulfates	[SO ₄] ²⁻ , comprend aussi [CrO ₄] ²⁻ ..
Tungstates *	[WO ₄] ²⁻ , comprend aussi [MoO ₄] ²⁻ .
Phosphates	[PO ₄] ³⁻ , comprend aussi [AsO ₄] ³⁻ , [VO ₄] ³⁻ , [SbO ₄] ³⁻
III. Silicates et alumino-silicates **	
Nésosilicates	[SiO ₄] ⁴⁻ .
Sorosilicates	[Si ₂ O ₇] ⁶⁻ .
Cyclosilicates	[Si ₃ O ₉] ⁶⁻ , [Si ₄ O ₁₂] ⁸⁻ , [Si ₆ O ₁₈] ¹²⁻ .
Inosilicates	[SiO ₃] ²⁻ , [Si ₄ O ₁₁] ⁶⁻ .
Phyllosilicates	[Si ₂ O ₅] ²⁻ , [AlSi ₃ O ₁₀] ⁵⁻ , [Al ₂ Si ₂ O ₁₀] ⁶⁻ .
Tectosilicates	[AlSi ₃ O ₈] ¹⁻ , [Al ₂ Si ₂ O ₈] ²⁻ , [Al ₂ Si ₃ O ₁₀] ²⁻ , [Al ₂ Si ₇ O ₁₈] ²⁻ .

* souvent classés avec les sulfates

** voir aussi le tableau suivant

⁹ Le terme "basique" est lié au groupe "OH" qui caractérise ce que les chimistes appellent "les bases", par opposition aux acides caractérisés par la présence de l'atome d'hydrogène "H".

Exemple d'affinités structurales : la classe des carbonates

Rhomboédrique		Orthorombique		Basiques*	
Calcite	Ca CO ₃	Aragonite	Ca CO ₃	Malachite	Cu ₂ (CO ₃) ₂ (OH) ₂
Sidérite	Fe CO ₃	Strontianite	Sr CO ₃	Azurite	Cu ₃ (CO ₃) ₂ (OH) ₂
Magnésite	Mg CO ₃	Whitérite	Ba CO ₃		
Rhodochrosite	Mn CO ₃	Cérusite	Pb CO ₃		
Smithsonite	Zn CO ₃				

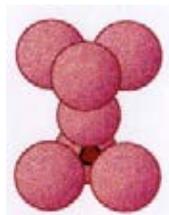
* on parle de carbonates basiques à cause de la présence du groupe (OH)

Le cas particulier des silicates

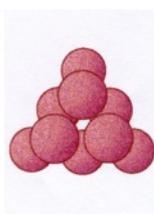
Les silicates sont les principaux constituants des roches éruptives et métamorphiques. A eux seuls, ils constituent 80% de la croûte terrestre. Si on leur ajoute encore le quartz, il faut porter ce chiffre à 92%. Le groupe anionique [SiO₄]⁴⁻ est constitué d'un petit atome de silicium entouré de quatre gros atomes d'oxygène qui occupent les sommets d'un tétraèdre imaginaire. On l'appelle habituellement le **tétraèdre** SiO₄. Ce groupe est très difficile à dissocier. En outre, ces tétraèdres présentent la particularité de se lier les uns aux autres en mettant en commun certains atomes d'oxygène. En d'autres termes, ils peuvent s'associer soit en groupes de 2 tétraèdres, soit en anneaux de 3, 4 ou 6 tétraèdres, soit encore en chaînes de longueur indéfinie, en couches et même en charpentes tridimensionnelles. Ces associations sont appelées des **polymères**. La classification est donc basée sur le degré de polymérisation des tétraèdres. Dans les silicates fortement polymérisés (chaînes, couches, charpentes), les atomes de silicium sont souvent partiellement remplacés par un atome d'aluminium. On parle alors d'**alumino-silicates**. Dans la muscovite, KAl₂[AlSi₃O₁₀][OH]₂, la parenthèse [AlSi₃O₁₀] montre qu'à l'intérieur d'un tétraèdre sur quatre, l'atome de silicium a été remplacé par un atome d'aluminium.

Polymérisation des tétraèdres SiO₄

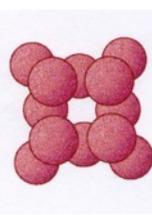
- | | | | |
|---|-----------------|---|---------------------------------------|
| 1 | nesosilicates | : | tétraèdres isolés les uns des autres. |
| 2 | sorosilicates | : | groupes de 2 tétraèdres. |
| 3 | cyclosilicates | : | anneaux de 3, 4 ou 6 tétraèdres. |
| 4 | inosilicates | : | polymérisation en chaînes. |
| 5 | phyllosilicates | : | polymérisation en couches. |
| 6 | tectosilicates | : | charpente à 3 dimensions. |



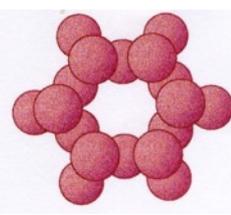
Si₂O₇
2 tétraèdres



Si₃O₉

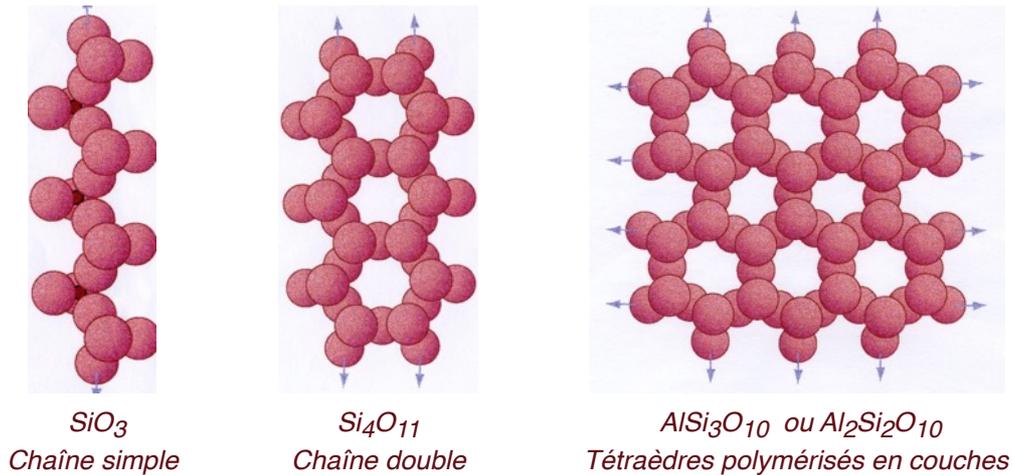


Si₄O₁₂



Si₆O₁₈

Anneaux de trois, quatre ou six tétraèdres



Abondance des minéraux dans la croûte terrestre

Il y a environ entre 3'500 à 4'000 espèces minérales reconnues. Sur ce nombre, on peut estimer que 200 espèces sont relativement fréquentes, 500 espèces occasionnelles et que toutes les autres sont rares ou très rares. On réserve le terme de *variété* aux minéraux qui diffèrent de la description habituelle de l'espèce par des propriétés physiques légèrement différentes (couleur, habitus) ou par une composition chimique faiblement modifiée dans le sens d'un remplacement partiel d'un élément par un autre. Citons à nouveau comme exemple, l'améthyste, variété violette de quartz, l'émeraude, variété verte de béryl, l'adulaire, variété d'orthose montrant un habitus particulier, la chiastolite, une variété d'andalousite à inclusions charbonneuses.

Si on examine comment ce nombre d'espèces minérales se répartit dans les diverses classes chimiques, on remarque que ce sont les silicates, les phosphates, les oxydes, les sulfures et les sulfates qui dominent. Ces composés rassemblent à eux seuls près de 80% de la totalité des espèces minérales.

Nombre d'espèces minérales par classes chimiques			
<i>silicates</i>	25.8 %	<i>halogénures</i>	5.8
<i>phosphates</i>	18.0	<i>carbonates</i>	4.5
<i>sulfures</i>	13.3	<i>éléments natifs</i>	4.3
<i>oxydes et hydroxydes</i>	12.7	<i>borates</i>	2.9
<i>sulfates</i>	9.4	<i>divers</i>	3.3

Considérée du point de vue de l'abondance des diverses classes dans la nature, la répartition se présente sous un aspect très différent. On remarque que les silicates et le quartz entrent déjà pour plus de 90 % dans la composition de la croûte terrestre et constituent l'essentiel des roches, alors que les autres classes chimiques, tels les phosphates, les sulfures, les sulfates ou les oxydes n'en constituent qu'une faible fraction. Il faut néanmoins souligner que malgré leur faible abondance dans la nature, ces derniers composés sont activement recherchés, car ce sont eux qui recèlent les richesses minérales dont l'Homme a besoin pour faire fonctionner ses industries.

Abondance des minéraux dans la nature (par classes)

<i>Silicates *</i>	<i>79 %</i>	<i>(dont 55 % uniquement pour les feldspaths et 12.6 % pour le quartz*)</i>
<i>oxydes</i>	<i>17</i>	
<i>carbonates</i>	<i>1.7</i>	
<i>phosphates</i>	<i>0.7</i>	
<i>chlorures et fluorures</i>	<i>0.5</i>	
<i>sulfures et sulfates</i>	<i>0.4</i>	
<i>éléments natifs</i>	<i>0.1</i>	

**si on classe le quartz parmi les silicates (au lieu des oxydes), ceux-ci représentent alors plus de 90% de la croûte terrestre.*

Aspects et propriétés des minéraux

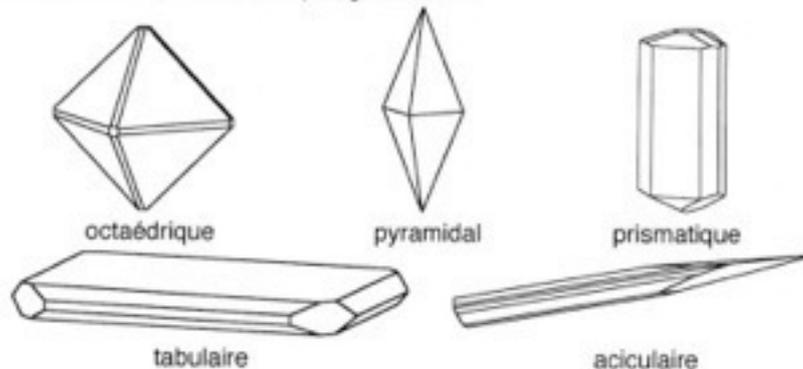
L'aspect extérieur des minéraux est très variable

Les minéraux ne présentent que rarement les belles formes cristallines aux faces brillantes, aux arêtes bien rectilignes et aux sommets acérés, qui font l'admiration des visiteurs des musées. Ce sont le plus souvent des grains informes (surtout lorsqu'ils apparaissent comme éléments constitutifs des roches), des masses mamelonnées, feuilletées, des stalactites, des encroûtements. On réserve donc l'appellation de *crystal* à ceux qui montrent une forme cristalline sur laquelle on distingue des faces, des arêtes et des sommets. Toutefois, même si la plupart des minéraux ne montrent pas de formes cristallines bien développées, ils présentent tout de même un certain nombre de caractères perceptibles par les sens et des propriétés physiques qui permettent de les décrire.

Les propriétés chimiques, physiques, optiques et cristallographiques ne sont pas toujours discernables directement à vue, et il faut recourir à des instruments de mesure pour les déterminer. L'aspect extérieur d'un minéral dépend globalement de l'ensemble de ses propriétés. Mais cela est insuffisant, tant la variabilité de cet aspect est grande d'un gisement à l'autre pour une même espèce minérale. Aussi, dans les lignes qui vont suivre, nous décrivons d'abord les aspects extérieurs des minéraux puis leurs propriétés physiques tout en soulignant les liens qui relient ces deux entités.

L'habitus décrit la forme extérieure

L'*habitus* décrit les diverses formes que peuvent prendre les minéraux. Pour les décrire, on utilise des qualificatifs précisant la forme géométrique liée au système cristallin ou une tendance vers



un aplatissement, un allongement, ou parfois encore, une forme particulière liée au mode de formation. On parle alors d'habitus octaédrique, pyramidal, prismatique, ou encore d'habitus isométriques¹⁰, allongé, prismatique, aciculaire, tabulaire.



Isométrique : grenat



Tabulaire : vanadinite



Prismatique : Béryl

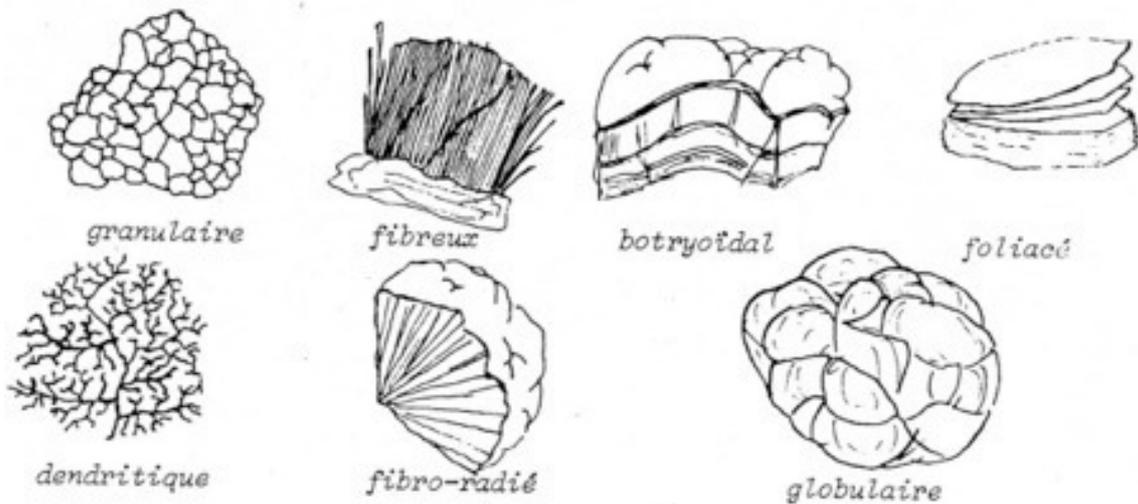
¹⁰ Qui possède un développement identique dans toutes les directions de l'espace

Les minéraux ne sont isométriques que s'ils appartiennent au système cubique. Ceux des autres systèmes cristallins présentent souvent un développement différent suivant la direction, ce qui aboutit à un aplatissement ou un allongement.

Il est intéressant de souligner que la tendance à l'allongement ou à l'aplatissement dépend de la géométrie de la maille élémentaire : une maille très allongée provoque l'aplatissement du minéral et, à l'inverse, une maille aplatie favorise un habitus prismatique.

Dans la nature, une même espèce minérale peut apparaître avec un habitus différent suivant les conditions de pressions et de températures dans lesquelles elle s'est formée, ou à cause de l'influence d'une très légère modification de sa composition chimique. Ainsi le béryl qui forme des prismes hexagonaux allongés lorsqu'il est vert (émeraude), ne donne plus que des prismes trapus comme des tambours lorsqu'il est rose (morganite) et devient franchement tabulaire lorsqu'il est incolore (goshénite).

Lorsque les minéraux sont groupés autrement qu'en cristaux individualisés, on leur attribue des qualificatifs évocateurs : massif, granulaire, fibreux, fibro-radié, foliacé, dendritique, stalactitique, globulaire...



Apparence des minéraux non individualisés



globulaire



fibreux



fibro-radié



dendritique

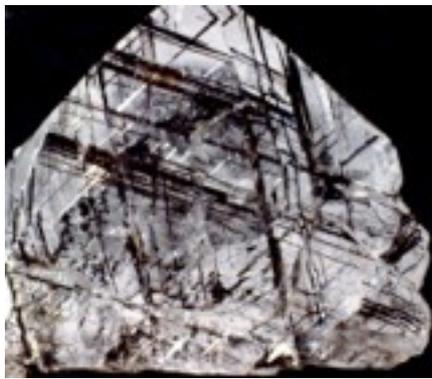
Les faces ne sont pas toujours parfaites

Les faces des cristaux ne sont pas toujours parfaitement planes et brillantes. Elles peuvent être aussi mates, rugueuses, striées. Elles peuvent même présenter une apparence courbe due à une croissance en gradins. L'aspect des faces peut parfois nous renseigner sur la symétrie du cristal. Par exemple, les faces des cubes de pyrite sont souvent striées parallèlement aux arêtes. Cela indique que les axes de symétrie perpendiculaires aux faces de ce cube ne sont pas des axes d'ordre 4, mais uniquement des axes binaires !



Faces striées de la pyrite

Les inclusions, une forme d'hospitalité

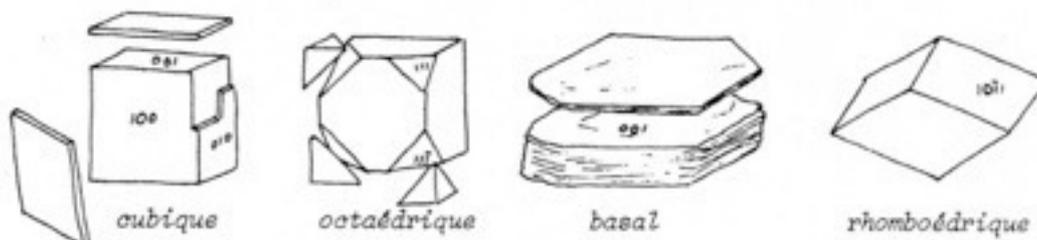


Aiguilles de rutile dans un cristal de quartz

Lorsqu'un minéral se forme rapidement (dans le cas des pegmatites, par exemple), la croissance n'est pas toujours uniforme et de nombreuses inclusions viennent voiler la limpidité des cristaux. Ce sont souvent de minuscules inclusions liquides, solides ou gazeuses, reliques des éléments nourriciers qui ont assuré la croissance du minéral et qui sont restées emprisonnées dans le cristal. Les inclusions sont souvent mixtes : gouttelette renfermant une bulle de gaz avec parfois même un petit cristal libre, isolé dans le liquide. On parle alors d'inclusions à une, à deux ou à trois phases. Dans d'autres cas, un minéral en voie de formation a simplement inclus des cristaux qui existaient déjà auparavant. L'exemple le plus connu est celui des aiguilles de rutile qu'on trouve fréquemment dans le quartz.

Le clivage, un signe de faiblesse de la structure

De nombreux minéraux présentent la propriété de se débiter le long de plans préférentiels lorsqu'on exerce sur eux une pression mécanique. Ce phénomène est particulièrement marqué pour les cristaux de calcite qui se débitent en rhomboèdres, pour les micas qui se débitent en feuillets et pour les cubes de fluorine dont on peut aisément tronquer les sommets.



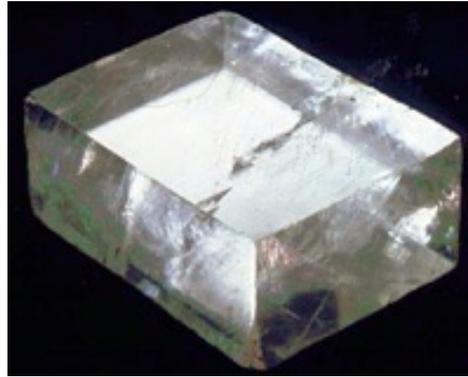
Mécanisme de clivages cubique, octaédrique, basal et rhomboédrique

Au niveau de la structure, les plans de clivage correspondent à une direction de liaison faible entre les atomes. Comme les propriétés physiques sont aussi soumises aux lois de la symétrie, une direction de plan de clivage unique ne peut exister que dans des minéraux à basse symétrie. Dans les autres cas, ils sont obligatoirement répétés par les éléments de symétrie du minéral. Ainsi on pourra observer un clivage cubique, octaédrique ou rhomboédrique lorsque les plans de clivages sont parallèles aux faces du cube, de l'octaèdre ou du rhomboèdre. Un clivage est dit **facile** ou **difficile** selon l'importance de l'effort mécanique qu'il a fallu exercer pour l'obtenir. On parle

aussi de *clivage parfait* si la surface obtenue est bien lisse et réfléchissante comme un miroir. Il est dit *imparfait* lorsque le plan obtenu ne réfléchit qu'imparfaitement un signal lumineux.



Plans de clivage octaédriques non encore divisés, visibles dans la fluorine.



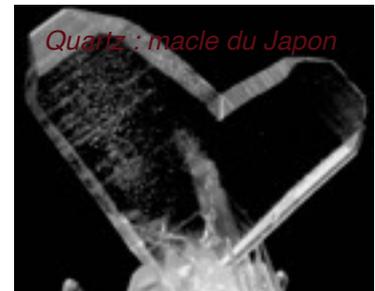
Rhomboèdre de calcite obtenu par clivage-

Souvent même, on distingue à l'intérieur des minéraux transparents les plans de clivages non encore divisés. Les intersections des plans de clivages avec une face du minéral dessinent des "lignes de clivages". L'observation de telles lignes constitue un indice supplémentaire dans la reconnaissance de certaines espèces minérales.

Les frères siamois sont fréquents : ce sont les macles

Le plus souvent, les agrégats de cristaux d'une même espèce cristalline s'agencent entre eux d'une manière quelconque. Parfois cependant, on observe des cristaux qui font penser à des "frères siamois" : deux par deux, ils sont soudés l'un à l'autre avec une orientation mutuelle qui est toujours la même. On parle de *cristaux maclés*.

Une étude plus attentive permet de déterminer les lois de macle qui décrivent du point de vue géométrique l'orientation mutuelle des deux individus. Les cristaux sont soit accolés par un plan commun, le *plan de macle*, soit interpénétrés. Dans le cas de la macle du rutile, on peut facilement identifier le plan de macle, le plan commun, et un opérateur de symétrie, l'*axe de macle* qui, dans le cas présent, est un axe binaire perpendiculaire au plan. Un des individus a donc effectué une rotation de 180° autour de l'axe de macle.



Quartz : macle du Japon

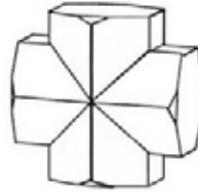
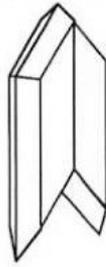


Loi de macle du spinelle. On distingue le plan de macle et l'axe de macle

Macles par interpénétration :



Gypse, macle "en fer de lance"



Staurotide, macle "en croix"



Fluorine



Orthose, macle de Carlsbad



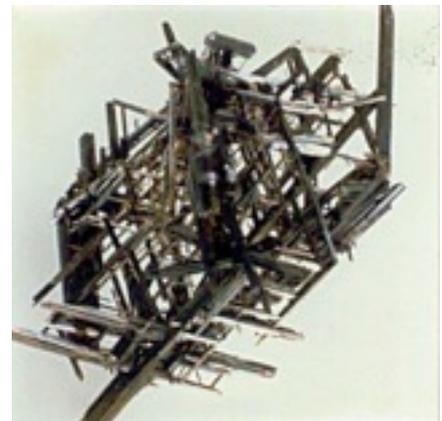
Le cas du rutile est simple. Cependant, le plus souvent, les lois de macle sont complexes et les individus sont interpénétrés. Il est aussi rare de rencontrer un groupe maclé complet. Par contre, on trouve souvent, en particulier dans les gisements de cassitérite, des fragments de cristaux qui montrent un angle rentrant, seul témoin évident de la présence d'une macle. C'est le fameux "bec d'étain" de la cassitérite. On décrit les macles sous des noms évocateurs, macle en fer-de-lance, en genou, en croix, ou sous des noms qui rappellent le gisement où elles ont été décrites originellement, macle du Japon, macle de Carlsbad, etc...

Les macles concernent parfois plus de deux individus. Dans certains cas, on observe un réseau de nombreux individus orientés les uns par rapport aux autres selon une loi géométrique bien précise. Le rutile, TiO_2 , en est l'exemple le plus frappant : on peut rencontrer ce minéral sous forme d'un réseau serré d'aiguilles entrelacées dans un même plan, parallèles à 3 directions orientées à 120° l'une de l'autre.

Rutile, réseau maclé d'aiguilles à 120° les unes des autres.

H.B. de Saussure avait baptisé "sagénite" le rutile ainsi maclé.

(«sagènè» signifie filet, en grec)



L'anisotropie caractérise les corps cristallisés

L'état cristallin se distingue de l'état amorphe (verre, certains plastiques) par l'*anisotropie* qui affecte la plupart de ses propriétés physiques. En clair, cela signifie que les propriétés sont différentes suivant la direction dans laquelle on les considère. L'aspect le plus évident de cette anisotropie est la vitesse de croissance des faces d'un cristal. Si la vitesse de croissance était identique dans toutes les directions, on aboutirait à la formation d'une sphère ! C'est justement la variation discontinue de la vitesse de croissance d'un minéral selon la direction qui est responsable de la forme des cristaux.

Le degré d'anisotropie des propriétés physiques est différent d'une espèce minérale à l'autre. Il dépend étroitement de leur structure et de leur symétrie. Dans une certaine mesure, les minéraux appartenant au système cubique font exception à cette règle : la plupart de leurs propriétés physiques sont isotropes.

Le poids spécifique

C'est le poids d'une unité de volume. On l'exprime en grammes par centimètre cube [g/cm³]. Quant à la *densité* d'un minéral, c'est le rapport de son poids spécifique à celui de l'eau. Les deux valeurs sont les mêmes, à ceci près que la densité est exprimée par un nombre sans unité.

Le poids spécifique d'un minéral dépend directement de sa composition chimique et, dans une moindre mesure, de sa structure. Il correspond au poids de tous les atomes contenus dans la maille élémentaire, divisé par son volume.

Variation du poids spécifique d'un minéral					
en raison de sa structure			en raison de sa composition chimique		
y	comp. chim	poids sp.	Minéral	comp. chim	poids sp.
graphite	C	2.2	calcite	Ca CO ₃	3
diamant*	C	3.5	sidérite	Fe CO ₃	3.5
andalousite	Al ₂ SiO ₅	3.15	smithsonite	Zn CO ₃	4.5
disthène*	Al ₂ SiO ₅	3.6	cérusite	Pb CO ₃	6.5

* structure compacte due à une formation sous haute pression

Le principe de la mesure du poids spécifique est simple : on divise le poids du minéral par son volume. Le volume s'obtient par une double pesée du minéral, dans l'air puis dans l'eau, la différence correspondant au poids du volume d'eau déplacé.

Balance de précision permettant la double pesée d'un échantillon



La dureté reflète la cohésion de la structure

La dureté reflète la résistance opposée par la structure cristalline aux efforts mécaniques qu'on lui fait subir. Pratiquement, c'est la résistance à la rayure. Un minéral est dit plus dur qu'un autre minéral lorsqu'il raye ce dernier. La mesure de la dureté est empirique et se fait par comparaison avec 10 minéraux de référence qui constituent l'échelle de dureté dite de Mohs.

La mesure de la dureté est aisée. Quand on dit que la pyrite a une dureté de 6.5, cela signifie qu'elle raye l'orthose mais est rayée par le quartz. La dureté dépend de la structure du minéral, de la taille des atomes, et des forces de liaison qui les unissent.

Echelle de dureté de Mohs

1 talc	6 orthose
2 gypse	7 quartz
3 calcite	8 topaze
4 fluorine	9 corindon
5 apatite	10 diamant

Boîte test comprenant :

divers minéraux de dureté de 1 à 9, une lamelle de verre ($d = 5.5$), une plaquette de porcelaine pour le trait, un petit chalumeau pour la fusibilité



Un des seuls exemples marquant d'anisotropie de dureté concerne le disthène. Ce minéral forme des cristaux tabulaires allongés. La dureté mesurée sur la face aplatie est de 4.5 dans le sens de l'allongement, et de 7 dans la direction perpendiculaire à celui-ci.

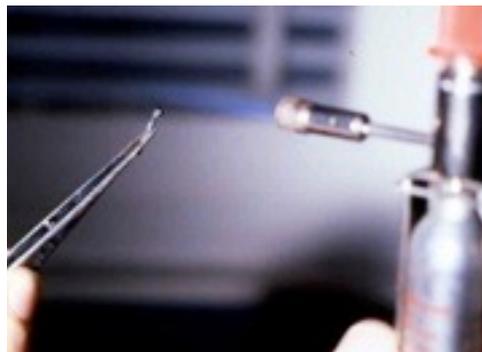
Disthène, Pizzo Forno, Suisse

La fusibilité

C'est la plus ou moins grande facilité que présente une esquille fine d'un minéral de fondre sous l'effet de la flamme d'un petit chalumeau. Il est difficile de parler de point de fusion comme pour les métaux car les minéraux restent souvent pâteux entre des limites de température assez grandes où ils se décomposent avant d'atteindre l'état liquide. Malgré ces considérations restrictives, les minéralogistes ont créé une échelle de fusibilité, un peu arbitraire, qui subdivise les minéraux en sept échelons se référant à sept minéraux de comparaison. La mesure de la fusibilité n'est pratiquement plus utilisée aujourd'hui.

Test de fusibilité :

Esquille tenue à l'extrémité d'une pince et exposée à la flamme d'un petit chalumeau.



Echelle de fusibilité des minéraux

<i>minéral de référence</i>		<i>comportement au chalumeau</i>
1	<i>stibine</i>	<i>fond immédiatement à la moindre flamme dans un tube fermé (575°).</i>
2	<i>chalcopryrite</i>	<i>fond aisément au chalumeau mais difficilement sur une flamme lumineuse (bougie) ou dans un tube fermé (800°).</i>
3	<i>almandin</i>	<i>fond facilement au chalumeau mais ne fond ni dans un tube fermé, si dans une flamme lumineuse (1050°).</i>
4	<i>actinote</i>	<i>les arêtes d'une esquille fondent rapidement au chalumeau mais les parties massives fondent peu ou pas du tout (1200°).</i>
5	<i>orthose</i>	<i>les arêtes d'une esquille fondent difficilement, les parties plus massives ne sont que légèrement arrondies (1300°).</i>
6	<i>enstatite</i>	<i>seules les parties les plus aiguës d'une esquille sont arrondies (1400°).</i>
7	<i>quartz</i>	<i>infusible au chalumeau.</i>

Les propriétés optiques

Nous ne décrivons ici que les propriétés optiques des minéraux dont les effets sont perceptibles à l'oeil nu et nous n'aborderons pas l'optique cristalline qui implique l'emploi de divers appareils, en particulier du microscope polarisant.

La transparence

*En premier lieu, on distingue les minéraux **transparents** de ceux qui sont **opaques**. Les premiers se laissent traverser par la lumière alors que les seconds l'arrêtent plus ou moins complètement. La limite n'est pas franche. La notion de transparence est relative et dépend beaucoup de la puissance des moyens d'investigation utilisés. La plupart des minéraux constitutifs des roches sont transparents lorsqu'on les observe au microscope en section mince (0.03 mm), alors que la plupart d'entre eux semblent opaques à l'oeil nu. On dit encore qu'un minéral est **translucide** lorsque qu'il laisse passer la lumière tout en masquant le contour des objets observés au travers.*

C'est parmi les sulfures et les oxydes métalliques qu'on rencontre les minéraux vraiment opaques, alors que la plupart des minéraux des autres classes sont transparents. C'est l'absorption plus ou moins sélective de la lumière par les minéraux qui détermine leur transparence, leur opacité et leur

couleur. L'indice de réfraction, associé aux diverses propriétés d'opacité, est responsable de l'éclat d'un minéral, c'est-à-dire de son aspect plus ou moins brillant, chatoyant ou terne.

La couleur est trompeuse

La couleur est un des caractères utilisés en premier lieu dans la description des minéraux. Toutefois les minéraux qui possèdent toujours une même couleur sont peu fréquents. Il faut donc être prudent et bien prendre conscience que la couleur de la plupart des minéraux est essentiellement variable et qu'elle peut être due à diverses causes très différentes :

1. Un des éléments chimiques constitutifs du minéral est **chromatophore**. Le minéral possède alors toujours sa couleur propre. Ainsi le cuivre colore les minéraux en vert ou en bleu, le manganèse en rouge violet, le lithium en rose rouge et le magnésium associé au fer donne une coloration vert jaune.
2. D'infimes traces d'un élément chromatophore sont dispersées au sein d'un minéral habituellement incolore. Une même espèce minérale peut donc présenter des couleurs différentes suivant la nature de l'impureté.
3. De fines inclusions modifient la coloration d'un minéral habituellement incolore. Quartz teinté en vert par de fines inclusions de chlorite ou en rouge foncé par des inclusions d'hématite.
4. La perturbation du réseau cristallin par la radioactivité naturelle de la roche peut provoquer l'apparition de teintes inhabituelles. L'exemple le plus connu est celui du quartz fumé dont la teinte brune plus ou moins foncée a été provoquée par la très faible radioactivité du granite au sein duquel il a séjourné plusieurs millions d'années. Cette coloration disparaît lorsqu'on chauffe le minéral. Il ne reprend plus sa couleur une fois refroidi. Par contre on peut "fumer" artificiellement un quartz incolore en le soumettant à une irradiation artificielle.



Rhodochrosite



Malachite



Azurite

Couleur due à un élément chromatophore constitutif du minéral

Elément	Couleur	minéral	formule chimique
Cuivre	vert	malachite	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$
	bleu	azurite	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$
	bleu-vert	turquoise	$\text{CuAl}_6(\text{PO}_4)_4(\text{OH})_8 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Lithium	rose	rubellite	$\text{Na}(\text{Li},\text{Al})_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{OH})_4$
Manganèse	rose	rhodonite	MnSiO_3
	rose	rhodochrosite	MnCO_3
	orange	spessartine	$\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
Chrome	vert	ouvarovite	$\text{Ca}_3\text{Cr}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$

Couleur due à une impureté en très faible quantité

minéral	comp. chim.	variété	couleur	Impureté
corindon	Al_2O_3	rubis saphir bleu saphir vert	rouge bleu vert	Cr Ti + Fe Fe ²⁺
spinelle	$MgAl_2O_4$	spinelle rouge spinelle bleu	rouge bleu	Cr Fe ²⁺
béryl	$Be_3Al_2Si_6O_{18}$	émeraude aigue-marine	vert bleu pâle	Cr Fe ²⁺



Emeraude



Aigue-marine



Rubis



Saphir

Couleur du trait

Le degré de division d'un minéral en petites particules joue un rôle important sur l'apparence de sa couleur. Si on le divise finement - en poudre par exemple - sa couleur s'éclaircit. L'hématite qui paraît gris-noir donne une couleur rouge brunâtre lorsqu'elle est réduite en poudre. Pour observer cette coloration il suffit de frotter le minéral sur une surface rugueuse dure. On utilise généralement une plaquette de porcelaine non vernissée sur laquelle le minéral laisse un trait coloré. **La couleur du trait** figure en bonne place dans les ouvrages de description de minéraux.



L'indice de réfraction, une question de vitesse de la lumière

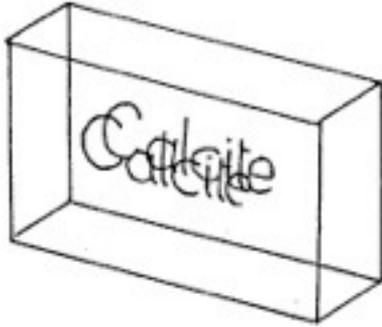
L'indice de réfraction est un nombre sans unité qui exprime le rapport de la vitesse de la lumière dans l'air à celle mesurée à l'intérieur du minéral :

$$n = \frac{\text{Vitesse de la lumière dans l'air}}{\text{Vitesse de la lumière dans le minéral}}$$

L'indice de réfraction est responsable de la déviation des rayons lumineux à la limite de séparation de deux milieux d'indices différents. Plus la différence des indices est grande, plus cette déviation est importante. C'est elle qui permet de distinguer un corps transparent incolore plongé dans un liquide transparent. Le relief d'un minéral plongé dans l'eau est d'autant plus marqué que la différence des deux indices est grande. L'indice de réfraction d'un minéral détermine non seulement son relief mais aussi son éclat.

La calcite est à l'origine de l'optique cristalline

La calcite est à l'origine de l'essor de l'**optique cristalline**. En effet, si on regarde un objet vu à travers un rhomboèdre de calcite parfaitement transparent et limpide, on observe deux images de cet objet. Une étude plus approfondie montre que chaque image obéit à un indice de réfraction différent de celui de l'autre et que, de surcroît, les ondes lumineuses qui matérialisent ces images sont polarisées.



Double réfraction de la calcite

Cette expérience révèle que les lois de l'optique à l'intérieur des minéraux sont très particulières. Ainsi, l'existence d'indices de réfraction variables compris entre deux extrêmes, l'indice minimum et l'indice maximum, a fait apparaître la notion de **biréfringence**, une constante optique qui peut être mesurée pour chaque espèce minérale. L'expérience de la double réfraction de la calcite est connue déjà depuis le XVII^e siècle. Elle est à l'origine de tout le développement de l'optique cristalline et a abouti à la construction du **microscope polarisant**, l'instrument indispensable aux minéralogistes et aux géologues.

L'éclat permet de briller

L'éclat est une appréciation quelque peu subjective qui dépend directement du pouvoir réflecteur. Ce dernier est défini comme étant la proportion de lumière réfléchiée par rapport à la quantité de lumière reçue.

Pour les minéraux transparents, le pouvoir réflecteur est toujours assez faible et ne dépend que de l'indice de réfraction. Les lois qui régissent le pouvoir réflecteur des minéraux opaques sont plus complexes. Ils peuvent présenter parfois des pouvoirs réflecteurs très élevés.

$$\text{pouvoir réflecteur} = \frac{\text{quantité de lumière réfléchiée}}{\text{quantité de lumière reçue}}$$

L'éclat **gras** ou **vitreux** caractérise les minéraux transparents à faible indice de réfraction (quartz, fluorine, tourmaline), l'éclat **adamantin** caractérise les minéraux transparents à haut indice de réfraction (cassitérite, rutile, diamant).

Relation entre l'éclat et l'indice de réfraction

Eclat des minéraux transparents			Eclat des minéraux opaques	
éclat	pouvoir réflecteur	indice de réfraction	éclat	pouvoir réflecteur
gras	4.8 %	1.3 à 1.5	submétallique	8 à 20 %
vitreux	6 %	1.5 à 1.8	métallique	20 à 50 %
subadamantin	12 %	1.8 à 2.2	supermétallique	> 50 %
adamantin	17.5 %	> 2.2		

Quant aux minéraux opaques, leur éclat est plus ou moins **métallique** suivant l'importance de leur pouvoir réflecteur.

La nature de la surface du minéral ou la présence d'inclusions microscopiques peut modifier l'éclat, et il existe toute une série de qualificatifs qui caractérisent ces aspects : résineux, laiteux, terreux, soyeux, terne, etc...

La photoluminescence

C'est l'émission de lumière que produit un minéral excité par un bombardement de photons énergétiques. La lumière émise possède toujours une longueur d'onde plus grande que celle qui provoque l'excitation. Ainsi, si on irradie un minéral susceptible de photoluminescence avec de la lumière issue du spectre visible, l'émission secondaire aura lieu dans l'infrarouge et ne sera pas perceptible à l'oeil. Il faut donc irradier les minéraux avec une lumière ultraviolette pour que l'émission secondaire se situe dans le spectre visible. Les minéraux sujets à ce phénomène sont dits **luminescents**. On utilise parfois le terme de **fluorescence** dont l'étymologie vient du minéral fluorine qui présente souvent ce phénomène.

Parfois même, certains minéraux émettent de la lumière quelques instants encore après l'extinction de la source excitatrice : on parle alors de **phosphorescence**. Il n'y a que très peu de minéraux qui sont toujours fluorescents : la scheelite (CaWO_4) et la willémite (ZnSiO_4). Par contre beaucoup d'autres minéraux sont occasionnellement luminescents (fluorine, apatite, calcite, aragonite, zircon...). Ce sont des impuretés - dites **phosphogènes** - qui sont responsables de cette luminescence occasionnelle, en particulier le manganèse (Mn) et le bismuth (Bi).

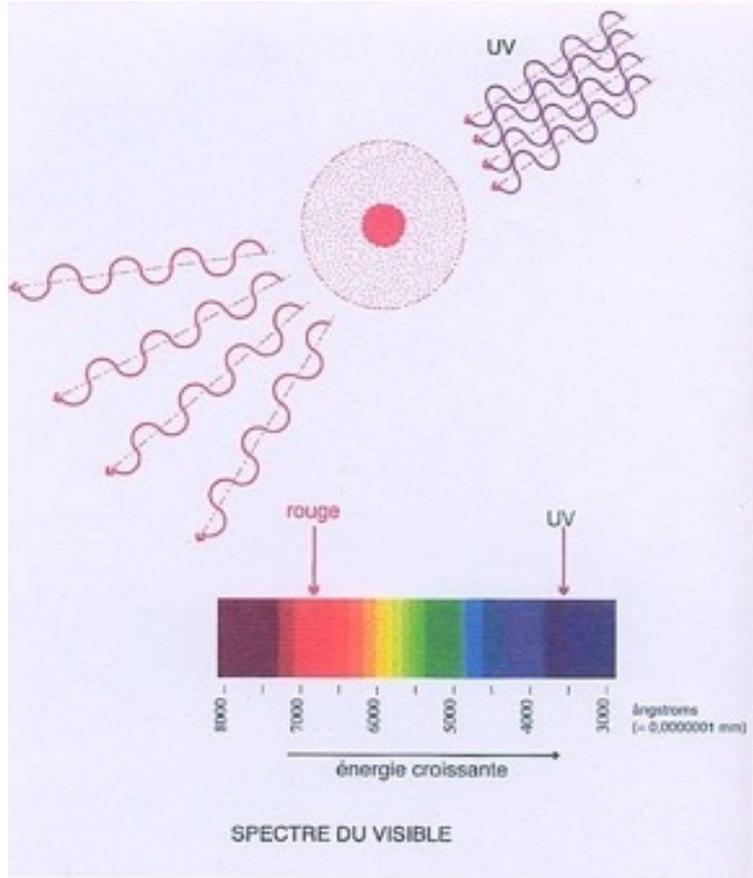


Schéma du phénomène de fluorescence : un atome réactif à un rayon UV incident

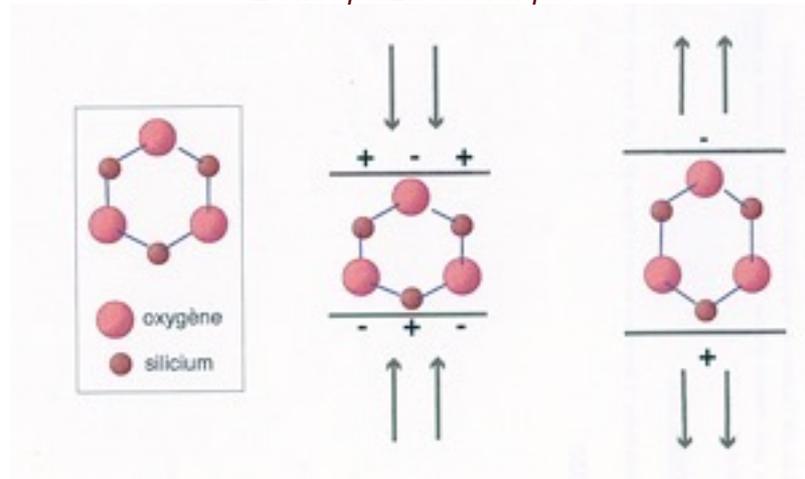
Propriétés électriques

Les propriétés électriques dépendent du type de liaison qui unit les atomes. Les minéraux à liaisons métalliques sont conducteurs d'électricité. Les minéraux à liaisons ioniques ou covalentes sont isolants ou montrent des propriétés de semi-conducteurs. Les minéraux non conducteurs auxquels il manque le centre de symétrie peuvent être électrisés par chauffage (pyroélectricité) ou par compression (piézoélectricité). Les exemples les plus connus sont la tourmaline qui, chauffée, devient porteuse de charges positives à l'une de ses extrémités, négatives à l'autre. Le quartz se recouvre de charges de signes opposés sur les deux faces d'une plaquette (taillée perpendiculairement à un axe de symétrie binaire) lorsqu'on la comprime. Ce dernier phénomène est très important et il a de nombreux usages en électronique (montre à quartz par exemple).

Les montres à quartz, une application de la piézo-électricité

La faible symétrie et l'absence d'un centre d'inversion confèrent au quartz des propriétés **piézo-électriques**. En clair, cela signifie qu'une plaquette de quartz soumise à une pression mécanique voit apparaître sur chacune de ses faces des charges électriques de signe opposé. Réciproquement, l'application à chacune de ses faces de charges électriques de signe opposé, déforme légèrement la plaquette.

L'effet piézo-électrique



Une pression exercée sur un cristal de quartz déforme très faiblement la structure, déplaçant les charges électriques dont sont porteurs les atomes de silicium et d'oxygène, provoquant une anisotropie dans la répartition des charges.

Si on introduit une plaquette de quartz convenablement taillée entre les électrodes d'un circuit oscillant, le quartz va se mettre à vibrer avec une fréquence propre qu'il impose au circuit. La fréquence dépend des dimensions de la plaquette et de son orientation cristallographique. On l'utilise donc comme étalon de fréquence dans de nombreuses applications de l'électronique.

Dans les montres à quartz, on utilise une plaquette de quartz qui vibre avec une fréquence de 16'384 périodes par seconde (= 2^{14} vibrations). Un circuit intégré dédouble 14 fois de suite le nombre de ces vibrations qui passe alors à une période par seconde, impulsion qui commande l'avance de l'aiguille des secondes.

Propriétés magnétiques

Certains minéraux sont sensibles à des champs magnétiques. Il faut toutefois des champs magnétiques assez puissants pour en percevoir les effets. C'est le cas, en particulier des minéraux renfermant du fer. En fait, il n'y a guère que deux minéraux qui sont fortement attirés par un aimant : la magnétite (Fe_3O_4) et, dans une moindre mesure, la pyrrhotine (FeS).



Parfois la magnétite peut se comporter comme un aimant

Propriétés chimiques

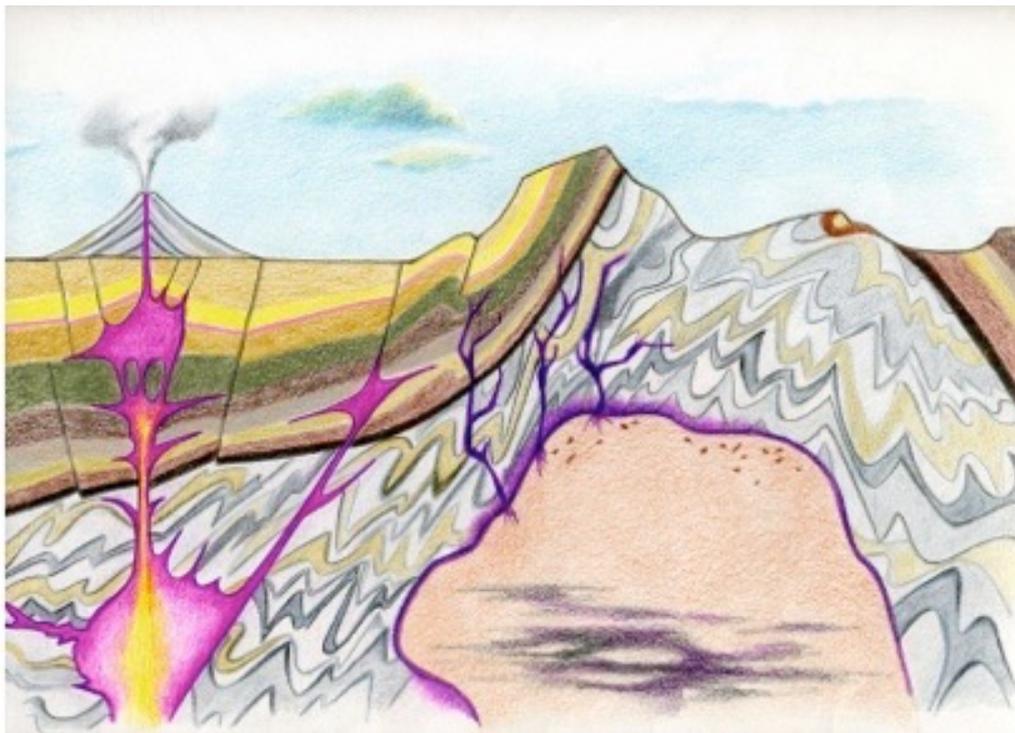
Sans un appareillage d'analyse complexe, il n'est pas possible d'avoir une idée précise de la composition chimique d'un minéral. Il n'y a guère que la solubilité de certains minéraux dans les acides qui puisse apporter quelques indications sur la classe chimique à laquelle ils appartiennent. La solubilité n'est pas toujours facile à observer. Certains minéraux ne se dissolvent que très lentement ou partiellement. Ce n'est que dans le cas de quelques carbonates, en particulier la calcite, que la solubilité dans l'acide est facilement observable, car la réaction entraîne le dégagement de gaz carbonique qui s'échappe de la solution en faisant effervescence.

Quelques rares minéraux laissent un goût marqué sur la langue : la halite (NaCl) ou sel de cuisine laisse un goût salé bien reconnaissable, la sylvine (KCl) donne une saveur piquante et la withérite (BaCO₃) un goût amer.

Les minéraux dans leur environnement

Les minéraux ne se forment pas n'importe où

Les minéraux que nous pouvons trouver dans la nature ne se sont pas formés n'importe où ni n'importe comment. Les amateurs de minéraux à la recherche de fissures susceptibles de receler des cristaux savent très bien qu'il vaut mieux explorer les régions constituées de roches granitiques ou métamorphiques plutôt que celles faites de roches sédimentaires. Les conditions favorables à la formation des minéraux dépendent des divers processus géologiques qui, au cours des temps, modifient l'aspect de la partie superficielle de notre planète.



Coupe imaginaire montrant les principaux environnements géologiques

On distingue un batholite de roches éruptives situé au milieu de roches métamorphiques. Il est bordé par une étroite zone de métamorphisme de contact. Des filons hydrothermaux s'en échappent. Une intrusion magmatique atteint la surface de la Terre, formant un édifice volcanique. Des roches sédimentaires s'empilent les unes sur les autres près de la surface.

C'est ainsi qu'on peut subdiviser les associations minérales et les roches en deux groupes d'après la source d'énergie qui leur a donné naissance :

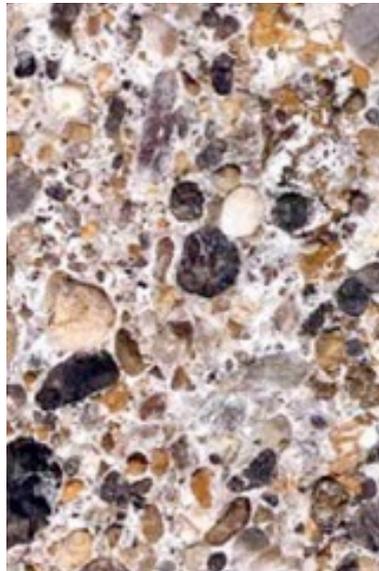
Les minéraux endogènes qui sont créés par des processus utilisant l'énergie interne du globe. Ce sont les produits de l'activité des magmas et des exhalaisons volcaniques qui s'en échappent. Ils se forment habituellement en profondeur, à des températures et des pressions élevées. Ce sont les minéraux des roches éruptives et des roches métamorphiques.

Les minéraux exogènes qui apparaissent au cours des processus qui utilisent l'énergie solaire que reçoit la surface du globe. Ces phénomènes se déroulent dans la partie superficielle de l'écorce terrestre, sous l'action d'agents physiques et chimiques de l'atmosphère, de l'hydrosphère et de la biosphère, à des températures basses et à des pressions voisines de celle de l'atmosphère. Ce sont les minéraux de la **zone superficielle d'altération** et les **évaporites**.

Les minéraux endogènes et exogènes peuvent subir à leur tour des transformations lorsque les conditions de pression et de température sont modifiées, à la suite par exemple d'un enfouissement profond sous d'autres roches ou au contact d'une intrusion magmatique. De nouveaux assemblages minéraux apparaissent alors au détriment de ceux qui existaient auparavant. C'est le phénomène du **métamorphisme** qui, lui aussi, fait appel à l'énergie interne du globe.



Roche éruptive : granite



Roche sédimentaire : conglomérat



Roche métamorphique : marbre veiné et plissé

Dans les roches éruptives¹¹

Minéraux constitutifs des roches éruptives



Batholite de granite avec zone de ségrégation magmatique stratiforme, quelques poches pegmatitiques vers la surface et filons hydrothermaux.

Les masses magmatiques qui se refroidissent lentement en profondeur donnent naissance à des minéraux silicatés parmi lesquels on trouve le quartz, des représentants des familles des feldspaths, des micas, des amphiboles et des pyroxènes. La cristallisation simultanée de la plus grande partie des minéraux confère à la roche un aspect granulaire. Il est donc rare de rencontrer dans ces roches des minéraux aux formes bien développées, à l'exception des premiers cristallisés qui, dans un magma encore liquide, n'ont pas été perturbés dans leur croissance par l'obstacle d'autres minéraux déjà solidifiés.

¹¹ Voir des mêmes auteurs «Le Monde fascinant des roches».

Minéraux des roches éruptives

Famille	Minéral	composition chimique
Quartz	quartz	SiO_2
Feldspaths	orthose albite anorthite	KAlSi_3O_8 $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
Feldspathoïdes	leucite néphéline	$\text{K(AlSi}_2\text{O}_6)$ $\text{KNa}_3(\text{AlSi}_4\text{O}_{14})$
Micas	biotite muscovite	$\text{K(Fe,Mg)}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$
Amphiboles	actinote hornblende	$\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5(\text{Si}_4\text{O}_{11})_2(\text{OH})_2$ $(\text{Ca,Na})_2(\text{Mg,Fe,Al})_5(\text{AlSi}_3\text{O}_{11})_2(\text{OH})_2$
Pyroxènes	bronzite augite	$(\text{Mg,Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$ $\text{Ca}(\text{Fe,Mg,Al})(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$
Péridots	olivine	$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$
Minéraux accessoires	ilménite, magnétite, apatite, sphène, zircon	

En plus des minéraux constitutifs qui forment la quasi-totalité de la roche, on y rencontre des minéraux dits "accessoires", c'est-à-dire des minéraux généralement de très petite taille mais qui sont omniprésents en très faible quantité dans la roche. Parmi ceux-ci mentionnons la magnétite, l'ilménite, l'apatite, le sphène et le zircon.

Les minéraux les plus réfractaires, c'est-à-dire ceux qui cristallisent les premiers, ont le plus souvent un poids spécifique plus élevé que celui du magma. Ils ont alors tendance à sombrer vers le fond de la masse magmatique encore fluide où ils peuvent constituer des accumulations stratiformes. Les grands gisements de fer de Suède (magnétite), ou de chrome de Turquie (chromite), sont le résultat d'accumulations de ce type. Cette séparation par gravité porte le nom de **ségrégation magmatique**.

Minéraux des pegmatites

Vers la fin du processus de cristallisation du magma, alors que presque toute la masse est déjà solidifiée, les composés les plus volatils se condensent dans les parties marginales du massif magmatique sous forme de liquides résiduels silicatés qui ont la particularité d'être riches en bore, fluor, phosphore, lithium et en quelques autres éléments chimiques peu fréquents. En se refroidissant, ils donnent naissance à des associations minérales intéressantes qu'on nomme **pegmatites**.

Le corps principal des pegmatites est constitué des mêmes minéraux que ceux de la roche mère : quartz, feldspaths et micas dans le cas d'une pegmatite issue d'un massif granitique. Les minéraux sont caractérisés par un certain gigantisme: leurs dimensions peuvent dépasser plusieurs décimètres, voire plusieurs mètres. En outre, les minéraux montrent presque toujours des formes cristallines bien développées. En plus de ces constituants courants, on y rencontre parfois des minéraux occasionnels : tourmaline, topaze, béryl, spodumène, zircon, cassitérite, wolframite et d'autres espèces encore, toutes fort appréciées des collectionneurs.

<i>Minéraux des pegmatites</i>	
<i>abondants</i>	<i>orthose ou ses variétés microcline ou amazonite, albite en feuillets (var. cleavelandite), quartz, muscovite, biotite, phlogopite.</i>
<i>fréquents</i>	<i>béryl, tourmaline noire, apatite, grenats.</i>
<i>occasionnels</i>	<i>tourmaline colorée, chrysobéryl, topaze, lépidolite, spodumène, zircon, cassitérite, columbo-tantalite, monazite, amblygonite, fluorine, cryolite.</i>



Pegmatite, Brésil : on distingue des cristaux d'orthose bien développés dont la taille atteint plus de 20 cm.

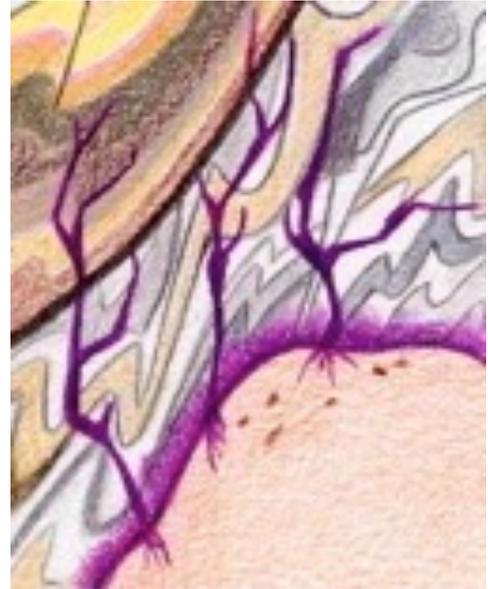
Pegmatites

*Sculptures exubérantes, cristaux géants,
empilements de formes géométriques parfois tronquées,
blancheur laiteuse de l'orthose, éclat discrets des feuillets d'albite,
gris sévère de quartz, chatoiement des feuillets de mica,
telles apparaissent les pegmatites,
roches exprimées de quelques granites
qui jalonnent leur périphérie d'auréoles
blanchies du kaolin issu de leur altération
et qui recèlent, disséminées dans leur chaos,
topaze, tourmaline, aigue-marine et autres pierres précieuses
que les galimperos recherchent fébrilement,
espoir de fortune, espoir d'une vie meilleure.*

Dans les filons hydrothermaux

Après la formation des pegmatites, les liquides résiduels, qui renferment encore de nombreux éléments dissous, s'accumulent sous forme de **solutions hydrothermales**. Ce sont des solutions aqueuses très chaudes, d'une température toutefois inférieure à 500 °C, qui, sous l'effet d'une pression élevée, s'infiltrèrent dans les fractures des roches encaissantes. Leur pression et leur température diminuent au fur et à mesure qu'elles se rapprochent de la surface de la croûte terrestre. Elles déposent sur les parois des fissures une succession de minéraux qui constituent les **filons hydrothermaux**. La température de formation des minéraux décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne du massif magmatique originel.

C'est dans ces filons qu'on trouve la plupart des sulfures métalliques bien connus, comme la pyrite, la galène, la



Filon hydrothermal avec blende, galène, chalcopryrite et quartz

blende, la chalcopryrite, la stibine et bien d'autres encore qui constituent les **minerais** recherchés des industriels. Ils renferment encore d'autres minéraux, parmi lesquels ceux que les mineurs appellent la **gangue**, soit les minéraux inintéressants du point de vue industriel et qui accompagnent le minerai (calcite, dolomite, sidérite, barytine et quartz).

Les minéralogistes distinguent encore les minéraux qui se sont formés à haute température de ceux qui ont été déposés par les solutions de basse température. Le tableau ci-dessous donne une idée de l'ordre de dépôt des minéraux dans les filons hydrothermaux.

Tous les minéraux que nous venons de citer se forment dans l'environnement de massifs magmatiques, à des profondeurs qui peuvent dépasser dix kilomètres. Bien évidemment, ils n'apparaîtront en surface que des millions d'années plus tard, lorsque le processus inéluctable de l'érosion aura fait disparaître toutes les roches qui les surmontent.

Exemples de minéraux d'origine hydrothermale :



Barytine sur dolomite, Cumberland



Blende et sidérite, Neudorf, Harz



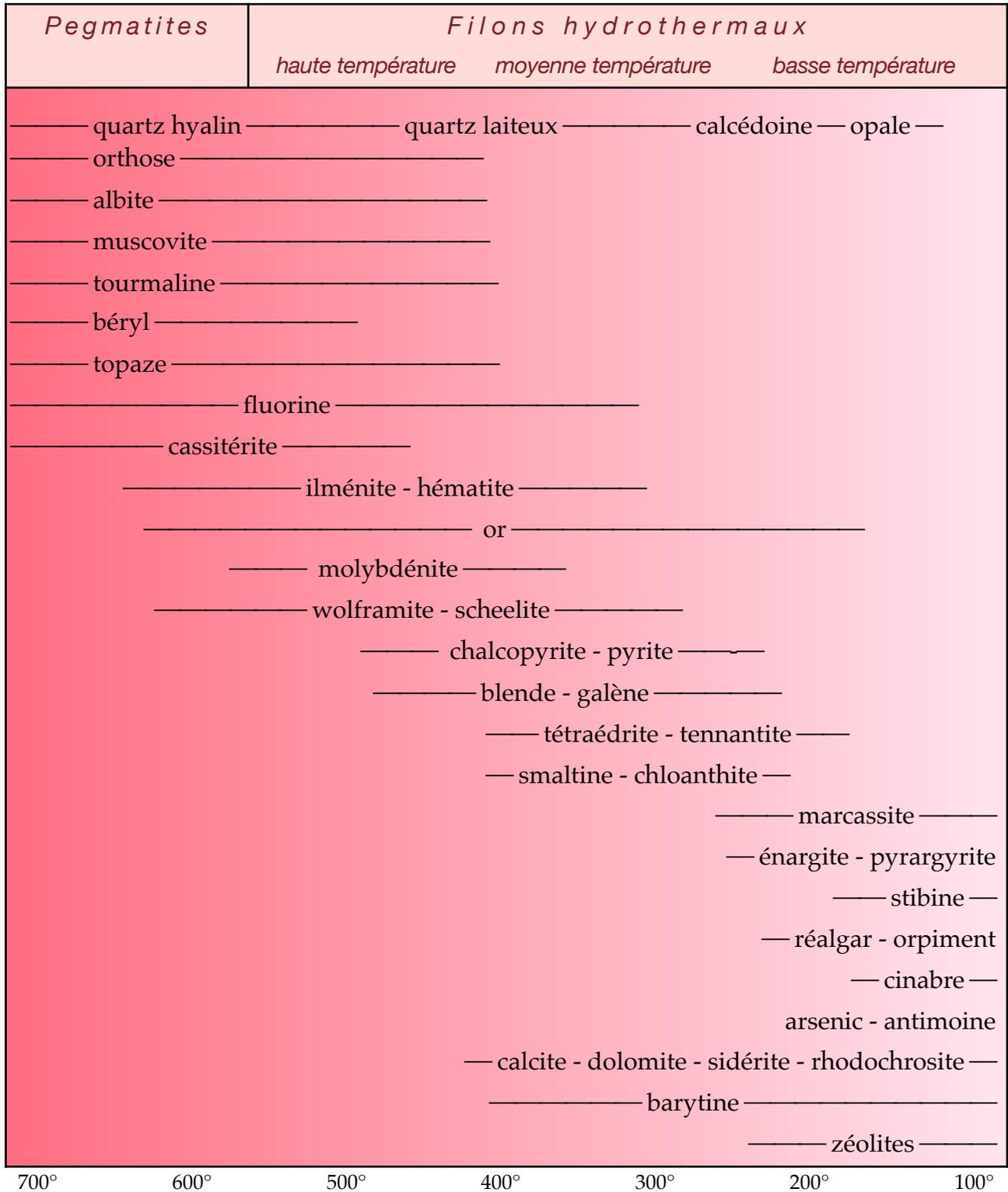
Wulfénite, Mexique

Minéraux des filons hydrothermaux

<i>haute température (300 - 500°)</i>	
<i>éléments</i>	<i>or, argent.</i>
<i>halogénures</i>	<i>fluorine.</i>
<i>sulfures</i>	<i>blende, galène, pyrite, chalcopryrite, arsénopyrite, bornite, chalcosine, pyrrhotine, nickéline, molybdénite, cobaltine.</i>
<i>oxydes</i>	<i>quartz, cassitérite, hématite, ilménite, magnétite, wolframite, rutile, anatase, brookite, uraninite.</i>
<i>moyenne température (200°-300°)</i>	
<i>éléments</i>	<i>or, argent, bismuth.</i>
<i>halogénures</i>	<i>fluorine.</i>
<i>sulfures</i>	<i>blende, pyrite, galène, chalcopryrite, bornite, chalcosine, nickéline, arsénopyrite, cobaltine, chloanthite, énargite, boulangérite, bournonite, polybasite, tennantite, tétraédrite.</i>
<i>oxydes</i>	<i>hématite, quartz, goethite, scheelite, wolframite.</i>
<i>carbonates</i>	<i>calcite, dolomite, sidérite, magnésite, whitérite.</i>
<i>sulfates</i>	<i>barytine, célestine.</i>
<i>phosphates</i>	<i>apatite.</i>
<i>silicates</i>	<i>épidote.</i>
<i>basse température (50°-200°)</i>	
<i>éléments</i>	<i>arsenic, antimoine, bismuth, or, argent, tellure.</i>
<i>halogénures</i>	<i>fluorine.</i>
<i>sulfures</i>	<i>argentite, chalcosine, cinabre, marcassite, miargyrite, pyrargyrite, proustite, stéphanite, tétraédrite, stibine, réalgar.</i>
<i>oxydes</i>	<i>calcédoine, opale, hématite, goethite, manganite.</i>
<i>carbonates</i>	<i>calcite, dolomite, sidérite, magnésite, strontianite.</i>
<i>sulfates</i>	<i>barytine, célestine.</i>
<i>silicates</i>	<i>groupe des zéolites.</i>

Il n'existe pas une limite bien tranchée entre le processus pegmatitique et le processus hydrothermal, si ce n'est l'apparition de l'eau sous sa forme condensée. Le tableau ci-dessous résume les conditions d'apparition des minéraux dans cette succession de processus.

Température de formation des minéraux des pegmatites et des filons hydrothermaux

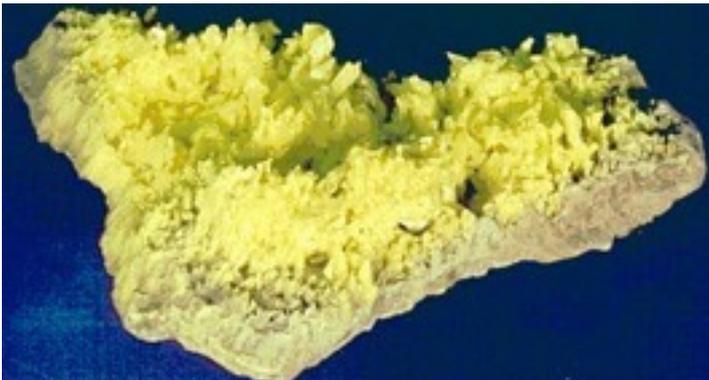
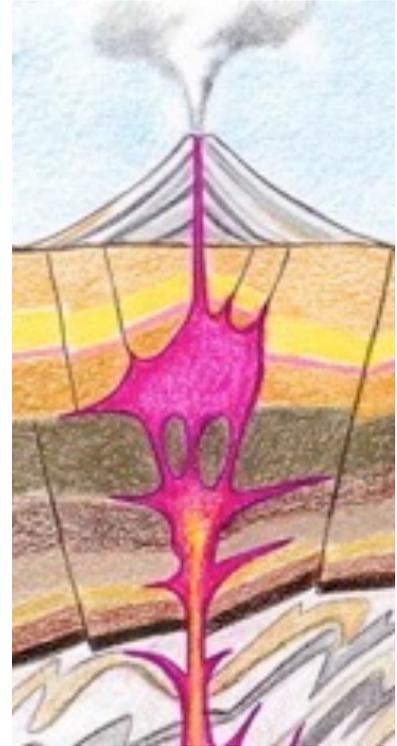


Autour des volcans

Les roches volcaniques sont des magmas qui, au lieu de cristalliser très lentement en profondeur, ont atteint la surface de la croûte terrestre. Les éléments volatils, en s'échappant brutalement, sont responsables de l'activité explosive du volcan. Une fois dégazées, les laves s'écoulent plus tranquillement en coulées qui se solidifient rapidement.

Les minéraux des laves sont toujours mal formés, rarement visibles à l'oeil nu. Il arrive parfois qu'on y trouve des minéraux plus gros. Ce sont ceux qui étaient déjà formés dans le magma avant qu'ils n'atteignent la surface de la croûte terrestre. Parmi ces minéraux, citons la leucite, l'augite, plus rarement l'olivine.

A proximité des exhalaisons gazeuses qui s'échappent de fissures (les fumerolles), on trouve toute une série de minéraux qui se sont formés par sublimation (passage direct de l'état gazeux à l'état solide). Beaucoup de ces minéraux sont délicats, fragiles, souvent facilement solubles dans l'eau. Ce sont principalement du soufre natif accompagné de divers sulfates.



Soufre natif, Vulcano

Il s'agit de la forme monoclinique qui caractérise les dépôts fumeroliens.

Minéraux des fumerolles volcaniques

<i>éléments :</i>	<i>soufre, arsenic, mercure.</i>
<i>sulfures :</i>	<i>cinabre, réalgar, stibine, pyrite.</i>
<i>oxydes :</i>	<i>hématite, magnétite, calcédoine, opale.</i>
<i>halogénures :</i>	<i>salmiac, halite, sylvine.</i>
<i>sulfates :</i>	<i>gypse, alunite.</i>
<i>silicates :</i>	<i>zéolites.</i>

Les bulles de gaz à l'origine des géodes

Les bulles de gaz qui se dégagent à l'intérieur d'une coulée de lave au cours de sa mise en place, restent souvent prisonnières de la roche. Elles forment des cavités sur les parois desquelles l'eau qui circule dans la roche peut déposer des beaux cristaux de quartz, d'améthyste, de calcite ou des zéolites. Ce sont les belles géodes qui font l'admiration des amateurs de minéraux. C'est un processus hydrothermal de basse température, analogue à celui que nous avons décrit plus haut, qui a lieu bien longtemps après la mise en place de la coulée de lave. Toutefois, dans le cas présent, les solutions ne sont pas issues du stade final de cristallisation d'un massif magmatique, mais ce sont des eaux de circulation provenant de la surface qui se sont enrichies en sels minéraux au contact des laves encore chaudes, puis les ont déposés plus loin, là où les roches étaient plus froides.



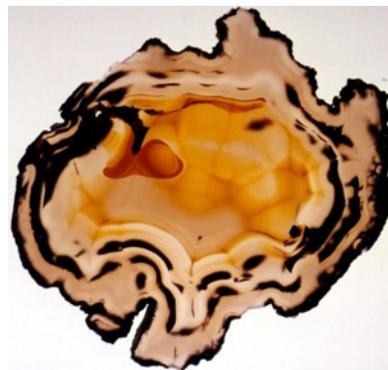
Géode d'améthyste, Brésil, h. : 150 cm
(Muséum de Genève)

Nodules de calcédoine

Parfois, la circulation des solutions hydrothermale un peu moins chaudes ne déposent que de la silice micro-cristalline en couches concentriques, ce sont les dépôts de calcédoine. Si ces dépôts sont disposés en bandes alternées de couleur différente, on distingue l'agate, l'onyx ou de sardonyx.



Calcédoine



agate



agate



onyx

Agates, Améthyste

Cavités tourmentées, cheminées mystérieuses ou bulles figées, tapissées de merveilleux cristaux colorés, ou gracieusement entartrées de calcédoine dont les couches successives, diversement teintées, épousent les irrégularités des parois, contournent les obstacles ou s'enroulent sur elles-mêmes, créant des formes et des mélanges de couleurs dont les plus grands artistes pourraient être jaloux, les géodes d'améthyste et les géodes d'agate fascinent par leur beauté, leur étrangeté et leur mystère.

Dans la zone d'altération superficielle

L'eau de pluie qui s'infiltré dans les roches superficielles contient, à l'état dissous, de l'oxygène, de l'acide carbonique et d'autres substances, qui lui confèrent un pouvoir oxydant et dissolvant important. Au-dessus du niveau hydrostatique (limite du niveau de l'eau dans un puits), l'eau circule rapidement, dissout les minéraux les plus solubles, laissant intacts les minéraux chimiquement stables. Des réactions chimiques complexes contribuent à la formation de nouvelles espèces minérales fortement enrichies en oxygène. D'où cette appellation : **zone d'oxydation**.

Dans la partie superficielle des gisements métallifères, les sulfures sont détruits et transformés en minéraux oxygénés : oxydes, carbonates, sulfates, arsénates, silicates. C'est ainsi qu'on trouve par exemple l'hématite, la goethite et la limonite, en ce qui concerne le fer, la malachite, l'azurite, le chrysocolle, l'olivénite, la brochantite, dans des mines de cuivre, l'anglésite, la cérusite, la pyromorphite et la mimétite dans les gisements de plomb, la smithsonite et la willémite dans ceux de zinc.

Lorsque les eaux d'infiltration - chargées d'éléments métalliques prélevés dans la zone d'oxydation - atteignent la nappe aquifère, il peut arriver que les minéraux primaires qui s'y trouvent soient enrichis à leur tour. C'est dans cette zone d'enrichissement qu'on trouve la bornite, le chalcocite, la covellite, le cuivre natif, l'argent natif, l'argentite.



Malachite, Shaba, Congo

Rhodochrosite, Argentine



En pays calcaire, l'eau s'infiltré dans les roches, élargit les fissures, crée des réseaux de rivières souterraines et de grottes, et y dépose stalactites, stalagmites, ainsi que diverses efflorescences de calcite ou d'aragonite.

Minéraux de la zone d'oxydation des gîtes métallifères

Métal	min. primaire	zone d'oxydation	zone d'enrichissement
Cuivre	chalcopryrite	malachite, azurite, cuprite, cuivre natif, brochantite, olivénite, diopside chrysocolle,	chalcosine, bornite, chalcopryrite, covelline.
Plomb	galène	anglésite, cérusite, pyromorphite, mimétite, vanadinite, wulfénite.	
Zinc	blende	smithsonite, hémimorphite, zincite, willémite.	
Fer	magnétite	hématite, goethite, limonite, vivianite.	
Manganèse	manganite	manganite, pyrolusite, psilomélane, rhodochrosite.	
Uranium	uraninite	torbernite, autunite, carnotite, sklodovskite...	

Minéraux résiduels

En surface, les minéraux résiduels non dissous par les eaux superficielles s'accumulent sur place ou, entraînés par le ruissellement, rejoignent les alluvions des cours d'eau. C'est ainsi que les grains de quartz libérés par la destruction des roches granitiques produisent le sable des rivières, des lacs et des océans. Certains minéraux insolubles, de dureté plus élevée, et plus denses que les autres, n'existant souvent qu'en faible quantité dans leur gisement originel, sont concentrés par gravité dans les alluvions. Ils constituent des gisements secondaires alluvionnaires fort recherchés. Ce sont les "minéraux lourds" que les prospecteurs retrouvent au fond de leur batée.

Minéraux résiduels non détruits par les agents de l'érosion

éléments	or, platine, diamant.
oxydes	quartz, magnétite, ilménite, cassitérite, rutile, corindon (rubis & saphir), spinelles, chromite, columbo-tantalite.
silicates	topaze, zircon, tourmaline, grenats.

Les évaporites

En pays chaud, les bassins fermés - mers, lacs - soumis à une évaporation intense, voient leur concentration saline augmenter puis, après saturation, des minéraux se déposent sur leurs fonds. Le minéral le plus connu par l'usage quotidien que nous en faisons est le chlorure de sodium que les minéralogistes appellent halite et les cuisinières sel de cuisine. Parmi les minéraux qui se forment selon ce processus, citons la sylvine, le gypse, plus rarement des borates.

On trouve surtout des sulfates et des halogénures dans les bassins marins, des borates et des nitrates dans les lacs en voie d'évaporation des pays désertiques.

Sulfates :		Borates :	
<i>gypse</i>	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	<i>borax</i>	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
<i>anhydrite</i>	CaSO_4	<i>kernite</i>	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
<i>célestine</i>	SrSO_4	<i>coléma-</i>	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Halogénures :		Nitrates :	
<i>halite</i>	NaCl	<i>nitratine</i>	NaNO_3
<i>sylvine</i>	KCl		
<i>carnallite</i>	$\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$		



Formation de sel sur le Lac Assal, Djibouti.



Halite, NaCl



Gypse, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Minéraux d'origine chimique liés à des roches sédimentaires

Divers minéraux peuvent se former dans les roches sédimentaires par des mécanismes chimiques ou biologiques complexes. On peut trouver dans ces conditions la calcite, la pyrite, la marcassite, l'hématite, la calcédoine et le soufre natif.



Soufre, Sicile

Minéraux issus du métamorphisme

Lorsqu'une roche est soumise à une augmentation de pression et de température, au contact d'une intrusion magmatique ou à la suite d'un enfouissement profond sous d'autres roches, elle subit une métamorphose - que les géologues appellent **métamorphisme** - qui fait apparaître un nouvel assemblage minéralogique au détriment de celui qui existait auparavant.

On pourrait comparer sommairement ce mécanisme à la cuisson d'un biscuit : l'aspect de la pâte n'est plus le même après la cuisson qu'avant son entrée dans le four !

Là aussi, les conditions de formation de ces minéraux sont bien connues. Ainsi leur assemblage est le témoin des conditions de température et de pression auxquelles la roche a été soumise. Pour les géologues, ces minéraux jouent les rôles de thermomètre et de baromètre.

Dans le cas du **métamorphisme général** (qu'on appelle aussi **métamorphisme régional**) la pression et la température augmentent toutes deux. Les minéraux qui se forment dépendent, d'une part de la composition minéralogique originelle de la roche et, d'autre part, de l'intensité du métamorphisme. Un métamorphisme faible voit se former le talc, la chlorite, l'épidote.

Lorsque le phénomène s'intensifie, on voit apparaître les grenats, le disthène, la staurotide, les micas, alors que le corindon et le graphite caractérisent des conditions de métamorphisme intense.

Il existe aussi un **métamorphisme de contact** provoqué par la chaleur d'une intrusion magmatique sur les roches encaissantes, accompagné souvent d'un apport chimique. Les nouveaux minéraux qui apparaissent sont surtout des silicates d'aluminium, de calcium et d'aluminium tels l'andalousite, la wollastonite, les grenats calciques (grossulaire, andradite) et la forstérite. Dans les roches calcaires, la taille des grains de calcite augmente au détriment de leur nombre, donnant ainsi naissance au marbre.



Disthène, Pizzo-Forno, Suisse



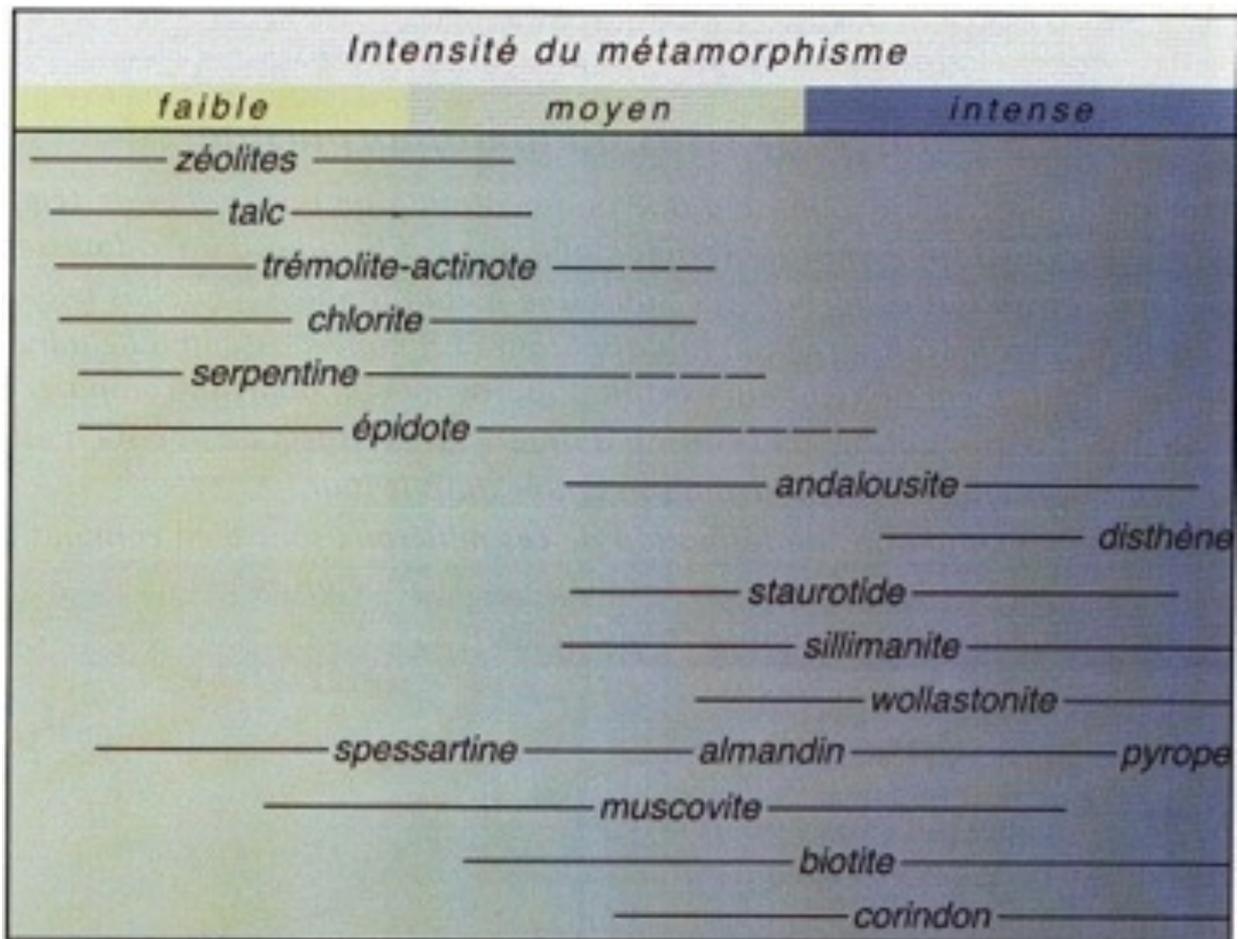
Schiste à staurotide



Staurotide



Grenat



Et lorsqu'on met le tout ensemble !

Nous venons de passer en revue les divers environnements géologiques dans lesquels se forment les minéraux. Il faut cependant nuancer un peu ces explications et bien se garder de croire que chaque espèce minérale n'a qu'un seul mode de formation. Bien au contraire, de nombreux minéraux sont formés dans des conditions diverses, et rares sont ceux qui n'apparaissent que dans un seul type d'environnement. On peut trouver le quartz, par exemple, aussi bien comme minéral constitutif des roches profondes que dans les pegmatites ou dans les filons hydrothermaux. Il est également un élément important des roches métamorphiques et on le rencontre encore dans les roches résiduelles sous forme de sable qui, une fois consolidé, constituera les grès. La pyrite également est un minéral qu'on peut pratiquement rencontrer dans tous les types d'environnements.

Par ailleurs, il n'y a pas toujours une limite tranchée entre les différents modes de formation. On ne peut pas dire précisément où se situe la limite entre les pegmatites et les filons hydrothermaux de haute température. On peut trouver la cassitérite, la wolframite, la columbo-tantalite aussi bien dans les uns que dans les autres. De même, le dépôt par solutions hydrothermales n'a pas nécessairement une origine magmatique : l'eau de circulation, qui imprègne et traverse petit à petit toutes les roches perméables, dissout certains de ses constituants, surtout si la température et la pression sont élevées. En atteignant des zones plus froides, et si la pression s'abaisse, cette eau va alors déposer des minéraux le long de son itinéraire. C'est de cette manière, par exemple, que les beaux cristaux de quartz se forment dans les fissures ouvertes des roches par l'action de solutions riches en silice. Les belles géodes tapissées de zéolites ou d'améthyste, qu'on trouve dans les cavités de certains basaltes, ont la même origine.



Calcédoine, Iles Féroé



Scolécite, Poona, Inde

Comment identifier les minéraux ?

Identifier un minéral, pas si simple !

Le minéralogiste amateur est souvent désarmé face au problème difficile de l'identification des minéraux. En effet, l'observation à vue, même secondée par une loupe binoculaire, ne permet d'identifier qu'un nombre restreint d'espèces minérales.

La marche à suivre pour déterminer un minéral ne peut pas être comparée à celle utilisée pour identifier une espèce animale ou végétale. Si, dans le règne animal, la présence ou non d'une colonne vertébrale ou d'autres organes caractéristiques dont la disposition, la forme, l'aspect, les dimensions (caractères directement perceptibles par l'oeil) permettent de les situer plus ou moins facilement dans les grandes divisions de la systématique (embranchement, classe, ordre, famille, genre et espèce), il n'en va pas de même pour les minéraux.

La classification en usage pour les minéraux est basée en premier lieu sur des affinités chimiques et, en second lieu, sur des analogies structurales. Ces critères de classement font qu'on retrouve dans un même groupe des minéraux aussi différents que l'or et le graphite, pour la bonne raison qu'ils sont tous deux constitués d'un seul élément, ou encore la galène et le cinabre, parce qu'ils appartiennent à la classe des sulfures, bien qu'aucun caractère morphologique visible ne permette de matérialiser cette parenté.

Les tables de détermination des espèces vivantes coïncident, dans leur approche, avec les subdivisions de la systématique alors que les critères de détermination des minéraux n'ont aucune analogie avec les grandes divisions de leur classification.

L'identification "à vue" se limite aux minéraux les plus typiques

Les constantes physiques et chimiques qui caractérisent une espèce minérale, densité, dureté, indices de réfraction, composition chimique, arrangement atomique, ne sont pas directement perceptibles par les sens de l'observateur. L'identification "à vue" est donc limitée à un petit nombre d'espèces dont les caractéristiques sont bien reconnaissables. Il faut donc recourir à des mesures précises au moyen d'appareils plus ou moins sophistiqués selon la difficulté qu'oppose un minéral à son identification.

Les instruments familiers des minéralogistes sont la loupe binoculaire, le microscope polarisant, la balance de précision, auxquels s'ajoutent quelques liqueurs denses, une grande série de liquides d'indices de réfraction différents, ainsi qu'un petit matériel de manipulation. Souvent même, ces instruments sont insuffisants pour identifier certaines espèces minérales. Il faut alors recourir à la diffraction des rayons X, ou rechercher la composition chimique à l'aide d'un système d'analyse monté sur un microscope électronique à balayage.

On peut tout de même en reconnaître quelques-uns !

Il existe tout de même un certain nombre d'espèces minérales - parmi les plus fréquentes, heureusement - dont les caractères directement perceptibles par les sens sont suffisamment évidents pour permettre leur identification rapide. Le nombre d'espèces identifiables "à vue" reste toutefois très limité et dépend de l'expérience de l'observateur.

La pratique de la détermination "à vue" est indispensable et l'on ne saurait pardonner à un minéralogiste amateur le fait de ne pouvoir identifier le quartz, la fluorine, la pyrite ou la galène. En revanche personne ne reprochera à un minéralogiste professionnel de ne pouvoir identifier à vue des minéraux tels que l'aphthalite, la bastnaesite ou l'aegyriine !

Les critères de reconnaissance des minéraux sont tout d'abord ceux qui sont perceptibles par les sens, principalement la vue. Ils concernent l'habitus, la couleur, l'éclat, la cassure, la présence éventuelle de plans de clivage. Exceptionnellement on fait appel au sens du toucher (toucher onctueux du talc, rugueux du corindon) ou à celui du goût (saveur salée de la halite, piquante de la sylvine, amère de la withérite).

Malheureusement ces critères sont souvent subjectifs et rarement constants. Ainsi l'appréciation de l'éclat peut être différente d'un observateur à l'autre. Quant à la couleur, elle n'est constante que pour un nombre très restreint de minéraux. Elle est par contre variable pour beaucoup d'autres.

Les amateurs et collectionneurs de minéraux sont portés tout naturellement sur les méthodes de détermination "à vue" par la qualité même des échantillons de leur collection. En effet, le choix dans l'acquisition de minéraux s'est porté sur des échantillons qui présentent des formes bien développées et dont l'apparence visuelle est conforme à la description standard de l'espèce. Ces mêmes collectionneurs seraient sans doute fort étonnés de ne pas reconnaître la cassitérite, la wolframite ou le corindon dans les petits grains informes et grisâtres extraits de la batée d'un prospecteur. De même, ils seraient bien embarrassés de devoir identifier les minéraux constitutifs d'une roche à grain fin.

Ces exemples montrent que le problème de la détermination des minéraux est complexe et qu'il n'est pas le même suivant qu'on se place sous l'angle de vue du collectionneur, du prospecteur minier, du pétrographe ou du minéralogiste.

Investissement matériel et intellectuel

L'investissement matériel en instruments ainsi que l'investissement intellectuel (degré des connaissances scientifiques acquises) sont directement liés au pourcentage des espèces minérales qui peut être identifié. Le tableau ci-contre tente de mettre en relation l'importance des moyens matériels et les connaissances nécessaires, en regard des renseignements obtenus et du nombre d'espèces qui peuvent être identifiés. Nous allons passer en revue les différents moyens qui conduisent à l'identification des minéraux en suivant la progression décrite sur le tableau.

Petit matériel de base pour débutant

On trouve ici le matériel minimum que tout amateur devrait posséder. Les techniques simples d'observation à la loupe, de mesure de la dureté, de la couleur du trait et de l'estimation de la fusibilité sont décrites dans tous les bons manuels de minéralogie.

Il faut une bonne loupe achromatique avec un grossissement compris entre 8 et 12 fois. Les observations portent sur l'habitus, sur une éventuelle forme cristalline, sur la présence possible de plans de clivage et de macles, la couleur, l'éclat et le degré de transparence.



Boîte pour les tests de dureté, de fusibilité et de mesure du trait.

Cette boîte qu'on peut construire soi-même renferme les minéraux témoins de dureté (sauf le diamant), une plaquette de porcelaine, une lame de verre, un petit chalumeau et un étui de quelques tiges de dureté

L'échelle de dureté est aisée à constituer soi-même car les minéraux de référence sont faciles à trouver dans toutes les bourses aux minéraux, à l'exception du diamant qui n'est pas indispensable¹. On peut se passer également du talc car il n'y a pas de minéraux dont la dureté soit inférieure à 1. À cette liste il faut ajouter une petite plaquette de verre, car la première opération est de vérifier si le minéral raye ou non le verre ($d = 5.5$). Pour les minéraux plus tendres que le verre, on essaye l'ongle du doigt ($d = 2.5$). De cette manière, on obtient immédiatement une approximation de la dureté du minéral.

*Investissement matériel et connaissances scientifiques
nécessaires à l'identification des minéraux.*

<i>Catégorie</i>	<i>Investissement matériel</i>	<i>Prix, €</i>	<i>Observations possibles</i>	<i>Connaissances nécessaires</i>	<i>Nombre d'espèces identifiables</i>
<i>I. Amateur débutant</i>	<i>Loupe, échelle Mohs, plaquettes de porcelaine, chalumeau.</i>	<i>30.- 50.- 10.- 50.-</i>	<i>Habitus, formes, macles, clivage, couleur, éclat, trait, dureté, fusibilité.</i>	<i>Comprendre la partie "minéralogie descriptive" d'un traité de minéralogie.</i>	<i>Seules les espèces les plus caractéristiques peuvent être identifiées (5 à 10 % des espèces)</i>
<i>II. Amateur averti, club amateurs de minéraux.</i>	<i>Loupe binoculaire, Liquides de densité, petit matériel de chimie.</i>	<i>2'500.- 1'000.- 300.-</i>	<i>Examen approfondi des caractères extérieurs, mesure approximative de la densité, solubilité, identification de qq. cations et anions.</i>	<i>Notions élémentaires de physique et une bonne habileté manuelle. Notions élémentaires de chimie.</i>	<i>Une part plus importante des espèces minérales peut être identifiée (10 à 15 % environ).</i>
<i>III. Université, Musée, club amateurs</i>	<i>Microscope polarisant, liquides d'indice de réfraction.</i>	<i>8'000.- 1'500.-</i>	<i>Constantes optiques des minéraux transparents.</i>	<i>Connaissance approfondie de l'optique cristalline et de la cristallographie</i>	<i>Presque toutes les espèces transparentes d'indice de réfraction inférieur à 2.0.</i>
<i>IV. Université, Musée</i>	<i>Générateur de rayons X avec quelques caméras.</i>	<i>50'000</i>	<i>Diagrammes de poudre pour identification.</i>	<i>Habilité manuelle, attention précise dans l'observation.</i>	<i>Permet d'identifier la quasi totalité des minéraux.</i>
<i>V. Laboratoires de recherche</i>	<i>Microscope électronique avec sonde électronique, diffractomètre automatique.</i>	<i>200'000 200'000</i>	<i>Micro-observations couplées avec l'analyse chimique. Structure cristalline.</i>	<i>Etudes universitaires</i>	

¹ Il n'y a pas de minéraux de dureté intermédiaire entre le corindon et le diamant.

<i>Estimation grossière de la dureté</i>	
<i>minéral rayé à l'ongle</i>	<i>dureté inférieure à 2.5</i>
<i>minéral non rayé à l'ongle mais ne rayant pas le verre</i>	<i>dureté comprise entre 2,5 et 5,5</i>
<i>minéral rayant le verre</i>	<i>dureté supérieure à 5.5</i>

On affine ensuite cette mesure à l'aide des minéraux de l'échelle de Mohs. On trouve aussi dans le commerce des jeux de tiges métalliques aux extrémités desquelles des minéraux de référence sont sertis qui couvrent les duretés de 5 à 10, avec en plus les duretés intermédiaires 6.5 et 7.5.



Tiges serties de minéraux pour la mesure des duretés comprises entre 5 et 9.

Couleur du trait

La couleur du trait s'obtient en frottant le minéral sur une plaquette de porcelaine rugueuse (non vernissée). On obtient un trait analogue à celui d'une craie frottée sur un tableau noir. La couleur du trait est beaucoup plus significative que celle du minéral lui-même. L'inconvénient est que les minéraux plus durs que la porcelaine ne laissent pas de trait. On peut aussi pulvériser finement un fragment du minéral dans un petit mortier et examiner la couleur de la poudre dispersée sur du papier blanc.



Mesure de la couleur du trait

<i>Minéral</i>	<i>Couleur apparente</i>	<i>Couleur du trait</i>
<i>hématite</i>	<i>gris, noir, brun</i>	<i>ocre</i>
<i>blende</i>	<i>jaune, brun, noir</i>	<i>brun</i>
<i>galène</i>	<i>gris métallique</i>	<i>gris</i>
<i>molybdénite</i>	<i>gris métallique</i>	<i>verdâtre</i>
<i>fluorine</i>	<i>incolore, jaune, bleu, vert</i>	<i>incolore</i>

L'examen de la fusibilité est rarement employé en raison de la subjectivité des observations. Par contre, on peut chauffer énergiquement une très faible quantité de minéral préalablement pulvérisé déposée soit au fond d'un petit tube fermé, soit au coude d'un tube ouvert. Certains minéraux se dissocient sous l'effet de la chaleur et les composants volatils se déposent à l'extrémité froide du tube fermé. Dans le tube ouvert, les vapeurs sont oxydées par le courant d'air. L'observation de ces dépôts peut apporter quelques informations sur la présence ou l'absence de certains éléments chimiques.

On peut ajouter à ce matériel un petit flacon d'acide chlorhydrique dilué qui permet de mettre en évidence certains carbonates, en particulier la calcite, un minéral qui fait très souvent partie, avec le quartz, des trouvailles des vacances. La calcite ne raye pas le verre et montre une effervescence au contact d'une goutte d'acide (à défaut d'acide, le vinaigre ou le jus de citron produisent le même effet). Le quartz ne réagit pas et raye le verre.

Matériel plus élaboré pour amateur averti

Dans un deuxième stade, après s'être rendu compte de la limite des moyens d'investigation que nous venons de décrire, l'amateur cherche à élargir son champ d'action. L'acquisition d'une loupe binoculaire devient nécessaire. Des grossissements compris entre 10 et 100 fois environ, associés à l'effet stéréoscopique de la vision binoculaire, assurent une observation aisée des formes cristallines, des associations de minéraux, des inclusions et de tous les aspects visuels des cristaux. À cela s'ajoute le plaisir de découvrir la beauté et la perfection du monde minéral microscopique.

Après la dureté, le poids spécifique ou densité d'un minéral est un des critères les plus fiables pour son identification. Le principe de mesure de la densité est théoriquement simple : il suffit de diviser le poids du minéral par le poids du volume d'eau qu'il déplace :

$$\text{densité} = \frac{\text{poids du minéral dans l'air}}{\text{poids du minéral dans l'air} - \text{poids du minéral dans l'eau}}$$

En pratique, la densité implique l'obtention d'un fragment de minéral bien isolé, dégagé de toute gangue et ne renfermant pas de grosses inclusions. Il faut disposer d'une balance de précision équipée d'un double plateau : un dans l'air, l'autre dans l'eau. On pèse successivement le minéral sur l'un puis sur l'autre plateau. La précision des mesures diminue toutefois avec la diminution de la taille de l'échantillon, et il faut renoncer à cette technique lorsque le minéral pèse moins de 0.1 gr.

Pour les petits échantillons, on peut utiliser des liqueurs dont on connaît la densité. Un fragment du minéral plongé dans une liqueur flotte ou sombre suivant que sa densité est plus faible ou plus élevée que celle de la liqueur. Cette méthode est limitée aux indices inférieurs à 4.3 car il n'existe aucune liqueur de densité plus élevée.

Quelques liqueurs d'emploi courant

Liqueur	densité	diluable dans
bromoforme	2.89	toluène, benzène
tétrabrométhane	2.96	toluène
di-iodométhane	3.32	toluène, benzène
liqueur de Clerici	4.28	eau distillée

D'une manière analogue à la mesure de la dureté, on compare la densité du minéral à celles d'une série de liqueurs. On peut même préparer, à l'aide de diluants spécifiques, des liqueurs de densité intermédiaire. Pour ce faire, on place dans la liqueur un minéral étalon de densité connue et on dilue la liqueur jusqu'à ce que le minéral flotte "entre deux eaux". Cette méthode est toutefois d'un usage limité en raison de la grande toxicité des liqueurs qui en rend l'utilisation dangereuse.

Quelques essais chimiques simples sont parfois utiles à ce stade de la détermination. En plus des essais de chauffage en tube fermé et ouvert décrits plus haut on peut examiner la réactivité des échantillons vis-à-vis des acides, déceler la présence de cations par coloration de la flamme d'un chalumeau, ou identifier la présence de certains anions par quelques tests spécifiques. Ces essais impliquent que l'amateur possède déjà une très bonne connaissance de la chimie. Ces examens ne sont plus décrits que dans quelques anciens traités de minéralogie. Aujourd'hui presque plus personne n'utilise ce genre de tests.

L'usage du microscope polarisant

L'emploi du microscope polarisant permet d'identifier sûrement toutes les espèces minérales transparentes à l'exception de celles qui ont un indice de réfraction très élevé. Ces méthodes permettent de mesurer diverses constantes optiques, en particulier les indices de réfraction, la biréfringence et le **pléochroïsme**. Elles permettent encore d'identifier le système cristallin du minéral.

Cette méthode implique l'achat d'un microscope polarisant et d'une collection de liqueurs de référence dont les indices de réfraction sont soigneusement étalonnés. C'est un investissement financier assez important. Par ailleurs ces techniques exigent de l'opérateur une connaissance approfondie de l'optique cristalline et une initiation à la pratique du microscope polarisant. La mesure précise des indices minimum et maximum est essentielle dans le processus d'identification des minéraux.

Le principe de la mesure est basé sur l'appréciation du "relief" qui se manifeste par l'importance du liseré sombre qui souligne le contour et les imperfections du minéral. Le "relief" de tout objet transparent plongé dans un liquide transparent est d'autant plus marqué que la différence des indices de réfraction des deux milieux est plus grande.

À la limite, lorsque les deux indices sont les mêmes, le relief disparaît et le minéral semble invisible.

Pratiquement, on place sous le microscope un peu du minéral réduit en une poudre grossière recouverte d'une goutte de liqueur dont on connaît l'indice de réfraction. Une méthode très simple permet de savoir si l'indice du minéral est plus grand ou plus petit que celui de la liqueur. En fonction de cette indication, on choisit une autre liqueur et, après examen avec plusieurs autres liqueurs, on parvient à déterminer les indices avec précision.

L'utilisation du microscope polarisant exige non seulement un investissement financier important mais aussi un patient apprentissage et une longue pratique qui ne sont que rarement à la portée d'un amateur de minéraux.



Microscope polarisant

Cependant, ces considérations ne doivent pas décourager les candidats à cet apprentissage : ils peuvent avoir la chance de trouver un microscope d'occasion et il est toujours possible de suivre à l'Université un cours d'optique cristalline ou de demander l'assistance d'un conservateur de musée !



Un peu de minéral est réduit en poudre dans un mortier.



Collection de flacons de liqueurs d'indices de réfraction étalonnés



Une technique permet de déterminer les indices du minéral par comparaison avec ceux des liqueurs

Un grand pas de plus : la diffraction des rayons X

Presque toutes les espèces minérales peuvent être identifiées à partir de leur diagramme de diffraction. Toutefois le prix élevé d'une installation de diffraction des rayons X en réserve l'usage aux institutions universitaires et aux musées. Par contre, une personne sans connaissances approfondies de la cristallographie peut facilement effectuer puis dépouiller un diagramme de diffraction, pour peu qu'elle applique avec soin une "marche à suivre" bien établie !



Caméra Debye-Scherrer

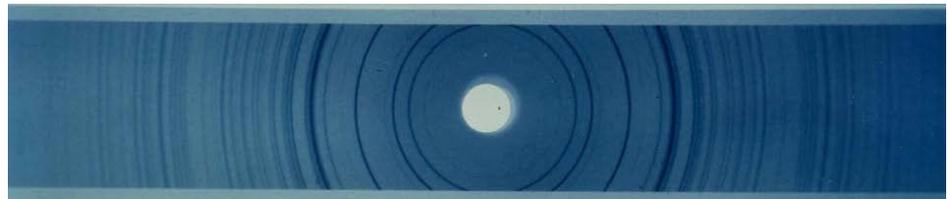


diagramme de diffraction obtenu avec une caméra Debye-Scherrer

Comment collectionner les minéraux



Une bourse aux minéraux

Réfléchir avant de commencer

Collectionner les minéraux n'est pas un acte anodin. Le futur collectionneur doit être au clair avec lui-même et être en mesure d'expliquer pourquoi il désire constituer une collection de minéraux et quel caractère il entend donner à sa collection. On peut collectionner :

- *de grandes et belles pièces décoratives pour orner le salon,*
- *le plus grand nombre possible d'espèces minérales,*
- *des échantillons bien représentatifs du règne minéral,*
- *les minéraux récoltés soi-même au cours d'excursion,*
- *tous les minéraux d'une mine voisine,*
- *des pierres semi-précieuses ou des cabochons,*
- *des très petits minéraux observables avec une loupe binoculaire¹²*

Il faut donc prendre une décision de principe et essayer de s'y tenir. Le plus raisonnable, à notre sens, est de réunir les minéraux les plus représentatifs du règne minéral, dont les formes, les as-

¹²*Technique connue sous l'appellation de "micromounts" ou micromontages*

sociations, la présence éventuelle de macles et la grande diversité d'aspect en feront des exemples utiles pour bien comprendre les fondements de la minéralogie.

Ni trop gros, ni trop petits



Il faut savoir aussi être raisonnable quant à la taille des échantillons qu'on acquiert. Il est préférable de choisir des minéraux assez petits, pour que leur achat ne soit pas ruineux, mais suffisamment gros tout de même, pour que leurs caractères extérieurs soient aisément discernables à l'oeil nu. Par exemple, on peut adopter une règle qui veut que les plus gros échantillons puissent prendre place aisément dans des cuvettes en carton de 7 × 10 cm, les plus petits dans des cuvettes de 5 × 7 cm.

Cuvette en plastique de 7 x 10 cm

Cristaux de leucite sur du basalte, Vésuve : Exemple de bonne proportion entre un minéral et sa gangue. L'échantillon mesure une dizaine de cm et le plus gros cristal environ 2 cm.



Une alternative intéressante : les “micromontages”¹³

La passion pour les minéraux peut rapidement devenir coûteuse. Le prix des minéraux augmente avec leur taille. Une solution intéressante est de restreindre son choix à des minéraux de très petites taille et de les observer avec une loupe binoculaire. C'est ce que les anglo-saxons appellent des “micromounts”. Cette solution présente plusieurs avantages :

- Plus les minéraux sont petits, plus leurs formes sont parfaites.*
- L'acquisition d'échantillons est beaucoup moins onéreuse. Le rangement de la collection est beaucoup plus simple.*

Les minéraux sont fixés sur le fond d'une petite boîte, un couvercle transparent permet de la refermer.

¹³ Consulter le site de l'Association française des micromonteurs : www.micromonteurs.fr



Loupe binoculaire



Petites boîtes de micromontae



Minéral dans sa boîte



Anatase 2,8mm Plan du Lac, Isère
Collection et Photo Jean Leconte

Anatase vue sous la loupe binoculaire

Qui trouve les beaux minéraux ?

C'est avant tout dans les mines qu'on trouve les plus beaux minéraux. Les collectionneurs n'y ont presque jamais accès et ce sont les mineurs qui les récoltent. En échange de la rudesse de leur travail, un accord tacite leur permet de garder pour eux quelques uns des minéraux qu'ils trouvent. Dans certaines régions, les mineurs exploitent pour leur compte des zones qui peuvent receler des minéraux. C'est auprès de ces mineurs que les marchands achètent les minéraux qui aboutiront ensuite dans les magasins spécialisés et sur les comptoirs des bourses aux minéraux.

Où se procurer des minéraux ?

Le plus facile pour commencer est de se rendre dans les bourses aux minéraux. Elles sont généralement organisées en fin de semaine, une fois par an, par la société locale d'amateurs de minéraux. On peut consulter le calendrier des bourses européennes dans la plupart des revues de minéralogie ou sur internet.

On peut aussi devenir membre d'un club d'amateurs de minéraux et participer aux excursions qu'il organise sur des gisements connus. Malheureusement la plupart des sites connus ont été déjà longuement fouillés et les trouvailles intéressantes restent rares.

*Bourse aux minéraux,
Genève, octobre 2006.*



Comment les choisir ?

On peut trouver des minéraux tout à fait isolés ou, au contraire, associés à d'autres minéraux avec lesquels ils se sont formés. Il vaut mieux acquérir ceux qui sont liés à leur **gangue**, car celle-ci fait partie de l'histoire du minéral et elle est représentative de l'environnement géologique dans lequel les minéraux se sont développés.

Esthétiquement, il faut qu'il y ait un équilibre entre la taille du minéral et les dimensions de la roche sur laquelle il est fixé. On peut décider arbitrairement que la taille du minéral ne doit pas être inférieure au cinquième de celle de l'échantillon complet. Il faut aussi impérativement que le vendeur indique avec précision la localité où l'échantillon a été trouvé : un échantillon sans provenance perd une grande partie de son intérêt !

Étiquettes et catalogue

Pour éviter toute confusion ultérieure, il faut attribuer un numéro d'identification à tout nouvel échantillon. Le plus simple est de le numéroter dans l'ordre chronologique de vos acquisitions. Ce numéro doit figurer, non seulement sur l'étiquette qui l'accompagne, mais aussi, et cela est très important, sur l'échantillon lui-même. Les petites étiquettes qu'on colle sur l'arrière de l'échantillon finissent toujours par se décoller. Le mieux est de déposer un petit rectangle (5 × 8 mm, environ) de peinture blanche acrylique au dos ou sous la base de votre nouvel échantillon et d'y inscrire le numéro d'identification à l'encre indélébile (encre de chine, par exemple).



Il faut aussi inscrire sur un cahier, en regard du numéro, le nom, la provenance, la date d'acquisition, éventuellement le nom du vendeur et le prix. Il faut vous imposer cette discipline qui confèrera à votre collection une bonne partie de sa valeur.

Vos premiers minéraux

Rendez vous dans une bourse aux minéraux, accompagné la première fois d'un ami connaisseur qui puisse vous conseiller et vous conduire sûrement vers les marchands dont les prix sont raisonnables en regard de la qualité des objets qu'ils offrent.

Les minéraux qui constitueront le début de votre collection sont faciles à trouver et ne sont pas très coûteux. Choisissez-les soigneusement de telle manière qu'ils soient de bons exemples des descriptions qui vont suivre. Il est probable que vous achèterez parfois plusieurs exemplaires de la même espèce minérale, tant ils peuvent être différents les uns des autres, d'un gisement à l'autre. Ainsi vous pourrez trouver de la pyrite montrant les formes du cube, de l'octaèdre, du dodécaèdre et même de la pyrite massive, sans forme extérieure. De même, votre collection peut comprendre de la fluorine verte, bleue, jaune, en cubes, en octaèdres ou encore sous une forme massive. C'est là un des secrets fascinants de la nature de pouvoir nous étonner, même lorsqu'on croit avoir vu toutes les formes d'une même espèce minérale !

Suggestions pour un début de collection

La liste des minéraux qui va suivre a été établie avec le dessein de permettre à des amateurs de constituer une collection déjà bien complète des minéraux les plus fréquents. Ce choix, évidemment arbitraire, a aussi été dicté par le fait que ce sont tous des minéraux peu onéreux et qu'on trouve facilement dans les bourses aux minéraux. Ils sont les représentants de la plupart des classes chimiques du règne minéral. En voici la liste :

<i>Classe</i>	<i>minéral</i>	<i>Classe</i>	<i>minéral</i>	<i>Classe</i>	<i>minéral</i>	
<i>Elements</i>	<i>cuivre</i>	<i>Carbonates</i>	<i>calcite</i>	<i>Silicates</i>	<i>zircon</i>	
	<i>soufre</i>		<i>siderite</i>		<i>olivine</i>	
	<i>graphite</i>		<i>rhodochrosite</i>		<i>disthène</i>	
<i>Halogénures</i>	<i>halite</i>		<i>dolomite</i>		<i>staurotide</i>	
	<i>sylvine</i>		<i>aragonite</i>		<i>topaze</i>	
	<i>fluorite</i>		<i>strontianite</i>		<i>grenats</i>	
<i>Sulfures</i>	<i>pyrite</i>		<i>cérusite</i>		<i>épidote</i>	<i>béryl</i>
	<i>galène</i>		<i>malachite</i>		<i>tourmaline</i>	
	<i>blende</i>		<i>azurite</i>		<i>diopside</i>	
	<i>chalcopyrite</i>		<i>Sulfates</i>		<i>barytine</i>	<i>spodumène</i>
	<i>marcassite</i>	<i>célestine</i>		<i>actinote</i>		
	<i>arsenopyrite</i>	<i>anglésite</i>		<i>asbeste*</i>		
	<i>molybdenite</i>	<i>gypse</i>		<i>hornblende</i>		
<i>stibine</i>	<i>Wolframates</i>	<i>wolframite</i>	<i>muscovite</i>			
<i>Oxydes</i>		<i>quarz</i>	<i>crocoïse</i>	<i>biotite</i>		
		<i>cassitérite</i>	<i>wulfénite</i>	<i>talc</i>		
	<i>rutile</i>	<i>Phosphates</i>	<i>apatite</i>	<i>orthose</i>		
	<i>corindon</i>		<i>pyromorphite</i>	<i>albite</i>		
	<i>Hématite</i>		<i>vanadinite</i>	<i>leucite</i>		
	<i>illménite</i>		<i>turquoise</i>	<i>scolécite</i>		
	<i>magnétite</i>			<i>stilbite</i>		
<i>spinelle</i>						

* variété fibreuse d'actinote

Classe des éléments natifs



Cuivre natif, Cu

Classe des éléments natifs

Système cubique

Poids spécifique 8.9

Dureté 2.5 à 3

Optique opaque

Formes naturelles

Masses informes arborescentes ou dendritiques, très rares cristaux (cubes ou octaèdres).

Propriétés physiques

Malléable, opaque, rouge-orange à brun, éclat métallique, souvent terni par l'altération, trait rouge-brun.

Gisements

Dans la zone d'enrichissement des gîtes de cuivre, plus rarement dans les cavités de certains basaltes.



Soufre¹⁴, S

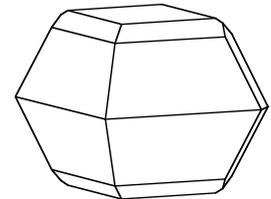
Classe des éléments natifs

Système orthorhombique

Poids spécifique 2.1

Dureté 1.5 à 2.5

Indice de réfr. 2.04



Formes naturelles

Cristaux trapus avec développement de pyramides, masses informes, encroûtements.

Propriétés physiques

Transparent à translucide, jaune clair, orangé à brunâtre, éclat résineux à adamantin. Fond facilement au chalumeau, rayable à l'ongle.

Gisements

Dans certaines roches sédimentaires.

¹⁴ il existe une forme monoclinique beaucoup plus rare, le soufre β , qui se forme par sublimation autour des fumerolles d'origine volcanique.



Graphite, C

Classe des éléments natifs

Système hexagonal

Poids spécifique 2.2

Dureté 1

Optique opaque

Formes naturelles

Cristaux tabulaires, masse foliacée.

Propriétés physiques

Opaque, gris acier, tache les doigts.

Gisements

Dans les roches éruptives et métamorphiques de haute température.

Classe des halogénures



Halite, NaCl

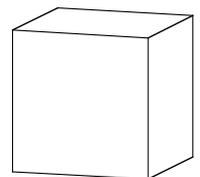
Classe des halogénures

Système cubique

Poids spécif. 2.16

Dureté 2,5

Indice de réfr. 1.54



Formes naturelles

Cubes fréquents avec parfois des faces en gradins, masses informes, filons compacts.

Propriétés physiques

Transparent à translucide, habituellement incolore, parfois teinté en bleu ou en rouge, éclat vitreux, très terne. Soluble dans l'eau, saveur salée.

Gisements

Dans les roches sédimentaires issues d'anciens bassins lagunaires riches en sels et dans les lacs salés en voie d'évaporation.



Sylvine, KCl

Classe des halogénures

Système cubique

Poids spécifique 2.0

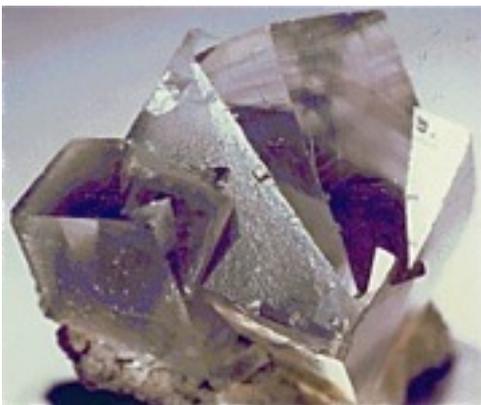
Dureté 2

Indice de réfraction 1.49

Formes naturelles Masse informe souvent rubannée

Propriétés physiques Translucide, rougeâtre. Éclat vitreux, soluble dans l'eau, saveur piquante.

Gisements Dans les roches sédimentaires issues d'anciens bassins lagunaires riches en sels et dans les lacs salés en voie d'évaporation.



Fluorine CaF_2

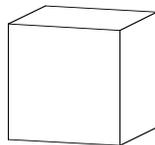
Classe des halogénures

Système cubique

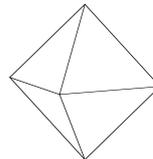
Poids spécifique 3.18

Dureté 4

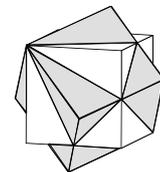
Indice de réfraction 1.43



cube



octaèdre



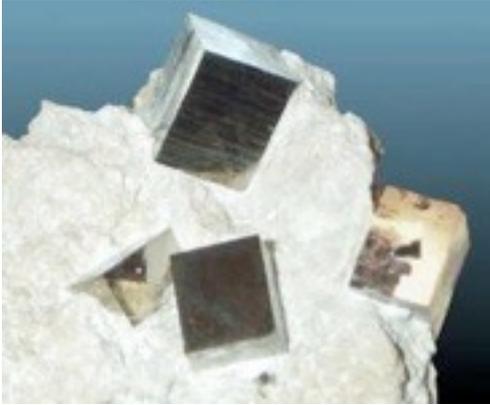
macles par interpénétration

Formes naturelles Cube fréquent, octaèdre plus rare, cubo-octaèdre, en masses compactes dans les filons, macles par interpénétration.

Propriétés physiques Transparent à translucide, incolore à fortement coloré en rouge, rose, jaune, bleu, vert, violet à noir, éclat vitreux.
Clivage octaédrique facile, bien visible sur les sommets des cubes.

Gisements Dans les filons hydrothermaux, les cavités des roches sédimentaires par action de solutions hydrothermales.

Classe des sulfures



Pyrite, FeS_2

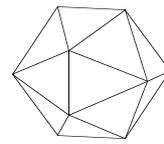
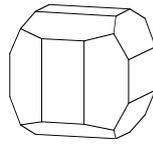
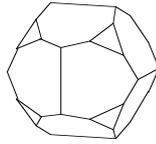
Classe des sulfures

Système cubique

Poids spécifique 5.02

Dureté 6 à 6.5

Optique opaque



Combinaisons du dodécaèdre pentagonal et de l'octaèdre avec divers développements des faces.

Formes naturelles

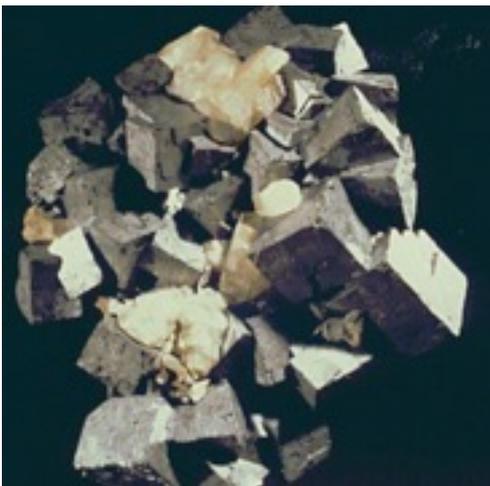
Cube, octaèdre, dodécaèdre pentagonal, ou combinaisons de ces formes, macles par interpénétration.

Propriétés physiques

Opaque, jaune bronze pâle, éclat métallique. Les faces du cube sont souvent striées parallèlement aux arêtes.

Gisements

Dans presque tous les types de roche, plus particulièrement dans les gisements hydrothermaux, dans certains schistes métamorphiques et dans les roches sédimentaires.



Galène, PbS

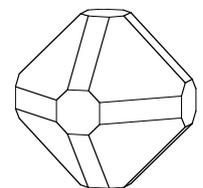
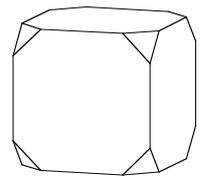
Classe des sulfures

Système cubique

Poids spécifique 7.58

Dureté 2.5

Optique opaque



Formes naturelles

Cube, octaèdre, dodécaèdre ou combinaisons de ces formes.

Propriétés physiques

Opaque, gris acier, éclat métallique, trait gris noir. Clivage cubique parfait, facile.

Gisements

Dans les filons hydrothermaux et dans certaines roches sédimentaires soumises à l'action de solutions hydrothermales.



Blende, ZnS

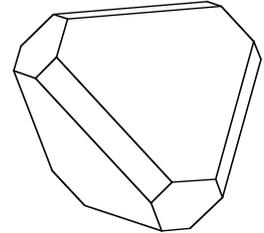
Classe des sulfures

Système cubique

Poids spécifique 3.9

Dureté 3.5 à 4

Indice de réfraction 2.37



Formes naturelles Cristaux tétraédriques, masses informes clivables.

Propriétés physiques Transparent à translucide, jaune miel, brun rougeâtre à noir, éclat adamantin, trait brun pâle. Clivage parfait laissant apparaître des surfaces très brillantes.

Gisements Dans les filons hydrothermaux de haute et moyenne température.



Chalcopyrite, $CuFeS_2$

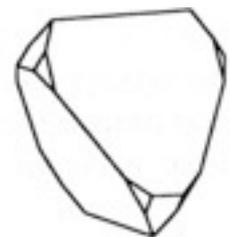
Classe des sulfures

Système quadratique

Poids spécifique 4.1 à 4.3

Dureté 3.5 à 4

optique opaque



Formes naturelles Tétraèdre déformé, masses informes clivables.

Propriétés physiques Opaque, jaune bronze avec reflets verdâtres, éclat métallique, trait noir verdâtre. Clivage bon, cassure conchoïdale.

Gisements Dans les filons hydrothermaux de haute et moyenne température.



Marcassite, FeS_2

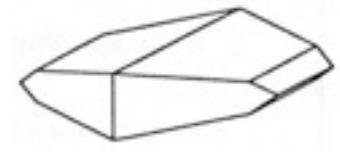
Classe des sulfures

Système orthorhombique

Poids spécifique 4.9

Dureté 6

optique opaque



- Formes naturelles* Cristaux trapus, parfois tabulaires, masse fibro-radiée.
- Propriétés physiques* Jaune laiton pâle à grisâtre, éclat métallique. Reflets verdâtres à la cassure.
- Gisements* Dans les filons hydrothermaux de haute et moyenne température. En concrétions dans les roches sédimentaires.



Arsenopyrite, $FeAsS$

Classe des sulfures

Système orthorhombique

Poids spécifique 6.0

Dureté 5.5

optique opaque

- Formes naturelles* Pseudo-octaèdres, prismes à section losangique, faces courbes.
- Propriétés physiques* Blanc étain à gris acier, éclat métallique.
- Gisements* Dans les filons hydrothermaux de haute et moyenne température. Principal minéral d'arsenic.



Molybdénite, MoS_2

Classe des sulfures

Système hexagonal

Poids spécifique 4.8

Dureté 1

optique opaque

- Formes naturelles* Cristaux hexagonaux tabulaires, lamelles flexibles. Masses foliacées.
- Propriétés physiques* Gris de plomb, clivage basal parfait, trait gris sur le papier.
- Gisements* Dans les filons hydrothermaux liés aux granites et dans les pegmatites.



Stibine, Sb_2S_3

Classe des sulfures de semi-métaux

Système orthorhombique

Poids spécifique 4.6

Dureté 2

optique opaque

- Formes naturelles* Prismes allongés à aciculaires, souvent striés dans le sens de la longueur. Cristaux parfois tordus.
- Propriétés physiques* Gris à éclat métallique, brillant.
- Gisements* Dans les filons hydrothermaux de basse température.

Classe des oxydes



Quartz, SiO_2

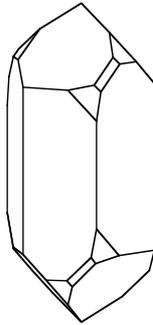
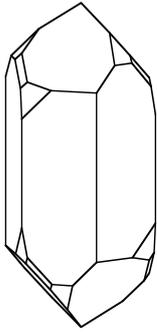
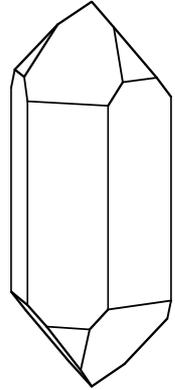
Groupe du quartz

Système rhomboédrique

Poids spécifique 2.65

Dureté 7

Indice de réfraction 1.54



Formes naturelles

Prisme hexagonal surmonté de deux rhomboèdres complémentaires montrant des développements différents. Parfois en filons massifs.

Propriétés physiques

Transparent à translucide, incolore à blanc laiteux, plus rarement brunâtre à noir, rose, jaunâtre ou vert, éclat gras à vitreux. Pas de clivage, cassure conchoïdale, faces prismatiques souvent striées.

Gisements

En grains informes dans les granites et les gneiss, en beaux cristaux dans les fissures des roches éruptives riches en silice et des schistes cristallins, dans les filons hydrothermaux et les pegmatites. Constituant majeur du sable des rivières et des océans. Participe à la formation des grès et des quartzites.



Cassitérite SnO_2

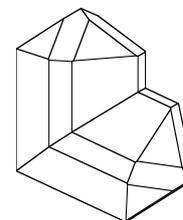
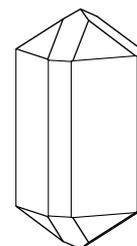
Groupe des oxydes quadratiques

Système quadratique

Poids spécifique 6.9 à 7

Dureté 6 à 7

Indice de réfraction 2.0



maclé "en genou"

Formes naturelles

Prisme court surmonté d'une pyramide à chaque extrémités. Grains informes, rognons.

Propriétés physiques

Translucide, presque opaque, brun noir, jaune miel, éclat résineux à adamantin, trait incolore. Très souvent maclée en "genou". La maclé complète est très rare, mais on observe très souvent un angle rentrant dit "bec d'étain".

Gisements

Dans les filons hydrothermaux de haute et moyenne température et dans les pegmatites.



Rutile TiO_2

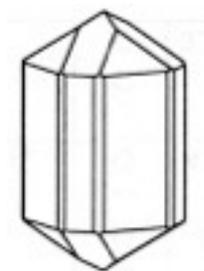
Groupe des oxydes quadratiques

Système quadratique

Poids spécifique 4.2

Dureté 6 à 7

Indice de réfraction 2.6 à 2.9



Formes naturelles

Prismes courts et pyramides. Souvent maclés. Réseau d'aiguilles à texture hexagonale (sagénite), en inclusion dans le quartz. Grains informes, rognons.

Propriétés physiques

Presque opaque, parfois translucide, noir à rouge, éclat adamantin, rutilant. Très souvent maclée en "genou".

Gisements

Minéral accessoire des roches éruptives, Dans les filons hydrothermaux de haute et moyenne température et dans les pegmatites.



Corindon, Al_2O_3

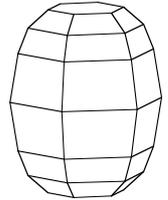
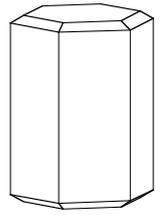
Groupes des sesquioxydes

Système rhomboédrique

Poids spécifique 4.0

Dureté 9

Indice de réfraction 1.76



Formes naturelles

Prisme hexagonal avec bipyramides, donnant l'aspect d'un petit tonneau, faces rugueuses et profondément striées, masses granulaires (émeri).

Propriétés physiques

Minéral le plus dur après le diamant. Transparent à translucide, presque opaque, incolore, gris, bleuâtre, jaunâtre, bleu profond (saphir), rouge (rubis).

Gisements

Dans les roches éruptives, les gneiss et autres roches métamorphiques riches en alumine.



Hématite, Fe_2O_3

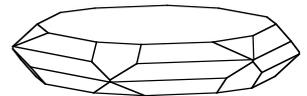
Groupes des sesquioxydes

Système rhomboédrique

Poids spécifique 5.26

Dureté 5 à 6

Indice de réfraction 2.8 à 3.1



Formes naturelles

Cristaux trapus ou tabulaires, rhomboèdre tronqué par des faces basales, minces feuillets hexagonaux arrangés en "rose de fer", masses informes, concrétions.

Propriétés physiques

Opaque, translucide sur le bord des minces arêtes, gris acier à éclat métallique, parfois rouge-brun sans éclat. Trait rouge brun.

Gisements

Dans les roches sédimentaires comme produit insoluble de l'altération superficielle, dans les fissures de certains basaltes et dans quelques roches métamorphiques. Dans les fissures alpines.



Ilménite, $FeTiO_3$

Groupes des sesquioxydes

Système rhomboédrique

Poids spécifique 4.5

Dureté 5 à 6

Indice de réfraction 2.8 à 3.1

Formes naturelles

Cristaux tabulaires épais, d'aspect rhomboédrique, parfois lamellaire.

Propriétés physiques

Opaque, noir à gris acier. Faiblement magnétique.

Gisements

Minéral accessoire des roches éruptives basiques, dans les pegmatites dérivées de syénites. Dans les sables qui dérivent de ces roches.



Magnétite, $FeFe_2O_4$

Groupe des spinelles

Système cubique

Poids spécifique 5.2

Dureté 6



Formes naturelles

Octaèdres, dodécaèdres plus rares, masse compacte

Propriétés physiques

Gris noir, opaque, éclat métallique, attirable à l'aimant.

Gisements

Minéral accessoire des roches éruptives, aussi dans les pegmatites et certains filons hydrothermaux. Dans les sables qui dérivent de ces roches.



Spinnelle $MgAl_2O_4$

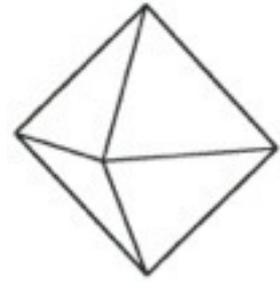
Groupe des spinelles

Système cubique

Densité 3.6

Dureté 7.5 - 8

Indice de réfraction 1.72



octaèdre

Formes naturelles Octaèdre fréquent, cube, tétraèdre, dodécaèdre plus rares.

Propriétés physiques Transparent à translucide. Toutes les couleurs sont possibles : rouge, bleu, vert, brun; éclat vitreux à terne.

Gisements Roches métamorphiques de contact, gneiss, gisements alluvionnaires. Parfois dans les pegmatites et les roches magmatiques.

Classe des carbonates, $[CO_3]$



Calcite, $CaCO_3$

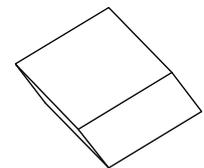
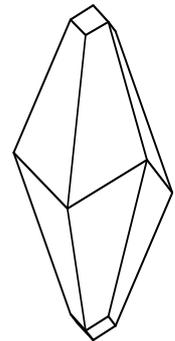
Groupe des carbonates rhomboédriques

Système rhomboédrique

Poids spécifique 2.71

Dureté 3

Indice de réfraction 1.49 à 1.66



Formes naturelles Scalénoèdre, rhomboèdre, prisme hexagonal, mais surtout associations très variées de ces diverses formes.

Propriétés physiques Transparent à translucide, habituellement incolore à jaunâtre, parfois teintée par des inclusions, éclat vitreux. Clivage rhomboédrique parfait, soluble dans les acides avec effervescence.

Gisements Principal constituant des calcaires et des marbres, gangue de certains filons hydrothermaux. Constitue le squelette de nombreux organismes marins (coquillages, foraminifères) et les coquilles des oeufs d'oiseaux.



Sidérite, FeCO_3

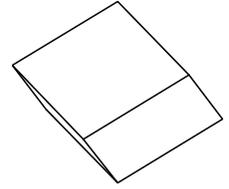
Groupe des carbonates rhomboédriques

Système rhomboédrique

Poids spécifique 3.9

Dureté 4 à 4.5

Indice de réfraction 1.64 à 1.87



<i>Formes naturelles</i>	<i>Rhomboèdres gris à brun foncé. Faces parfois courbes. Concrétions.</i>
<i>Propriétés physiques</i>	<i>Brunâtre à éclat vitreux. Clivage rhomboédrique parfait.</i>
<i>Gisements</i>	<i>Dans les filons hydrothermaux de moyenne et basse température.</i>



Rhodochrosite, MnCO_3

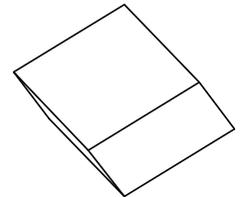
Groupe des carbonates rhomboédriques

Système rhomboédrique

Poids spécifique 3.5

Dureté 4

Indice de réfraction 1.60 à 1.81



<i>Formes naturelles</i>	<i>Rhomboèdres rares, masses cristallines, concrétions.</i>
<i>Propriétés physiques</i>	<i>Rose à rouge framboise, éclat vitreux.</i>
<i>Gisements</i>	<i>Rare dans les filons hydrothermaux de moyenne et basse température. Dans les roches sédimentaires en relation avec les gîtes de manganèse.</i>



Dolomite, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$

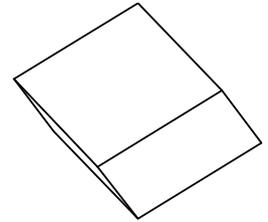
Groupe des carbonats rhomboédriques

Système rhomboédrique

Poids spécifique 2.9

Dureté 4.5

Indice de réfraction 1.50 à 1.68



Formes naturelles Rhomboèdres fréquents à faces courbes. Masses cristallines.

Propriétés physiques Blanc à gris, parfois jaunâtre. Clivage rhomboédrique parfait.

Gisements Abondante comme dépôt sédimentaire sous forme de roche (la dolomie), plus rare dans les filons hydrothermaux



Aragonite, CaCO_3

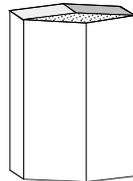
Groupe des carbonates orthorhombiques

Système orthorhombique

Poids spécifique 2,94

Dureté 3.5 à 4

Indice de réfraction 1.53 à 1.68



macles triples

Formes naturelles C'est une variété polymorphe de la calcite. Cristaux aciculaires. L'accolement de trois prismes à section losangique constitue parfois un pseudo-prisme hexagonal. Constitue les stalactites des grottes et les coquilles d'oeufs des reptiles.

Propriétés physiques Transparent à translucide, incolore, jaunâtre, bleuâtre, rouge brun, éclat vitreux à résineux. Soluble dans les acides avec effervescence.

Gisements Formation de basse température dans les roches sédimentaires superficielles. Autour des fumerolles volcaniques. Concrétions et stalactites dans les cavernes.



Strontianite, SrCO_3

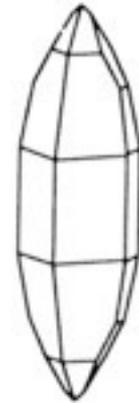
Groupe des carbonates orthorhombiques

Système orthorhombique

Poids spécifique 3.7

Dureté 5

Indice de réfraction 1.52 à 1.67



<i>Formes naturelles</i>	<i>Cristaux prismatiques rares, parfois aciculaires.</i>
<i>Propriétés physiques</i>	<i>Translucide, blanc, parfois jaunâtre, brunâtre ou rose.</i>
<i>Gisements</i>	<i>En concrétions dans les géodes des roches sédimentaires.</i>



Cérusite, PbCO_3

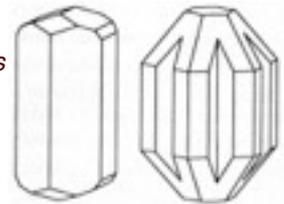
Groupe des carbonates orthorhombiques

Système orthorhombique

Poids spécifique 6.5

Dureté 3

Indice de réfraction 1.87 à 2.08



<i>Formes naturelles</i>	<i>Cristaux prismatiques souvent allongés, habitus allongé ou lamellaire. Macles fréquentes en réseau triangulaire.</i>
<i>Propriétés physiques</i>	<i>Transparent à translucide, blanc à éclat adamantin.</i>
<i>Gisements</i>	<i>Zone d'oxydation des gisements de plomb. Plus rarement dans les filons hydrothermaux de basse température.</i>



Malachite, $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$

Groupe des carbonates basiques

Système monoclinique

Poids spécifique 4.0

Dureté 4

Indice de réfraction 1.66 à 1.91

Formes naturelles Cristaux très rares, encroûtements mamelonnés, stalactites.

Propriétés physiques Opaque, vert foncé à vert clair, en bandes alternées.

Gisements Zone d'altération des gisements de cuivre.



Azurite, $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$

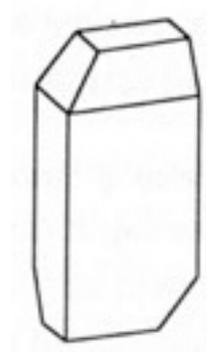
Groupe des carbonates basiques

Système monoclinique

Poids spécifique 3.9

Dureté 4.5

Indice de réfraction 1.73 à 1.83



Formes naturelles Cristaux prismatiques aplatis, masses granulaires compactes.

Propriétés physiques Bleu foncé, brillant, éclat vitreux.

Gisements Zone d'altération des gisements de cuivre.

Classe des sulfates, [SO₄]



Barytine, BaSO₄

Groupe des sulfates anhydres

Système orthorhombique

Poids spécifique 4.5

Dureté 3 à 3.5

Indice de réfraction 1.64 à 1.65



Formes naturelles

Cristaux prismatiques à symétrie orthorhombique reconnaissable, parfois agrégats en rosettes ou en feuillets.

Propriétés physiques

Transparent à translucide, incolore jaunâtre, bleuâtre, gris à brun, éclat vitreux à résineux.

Gisements

Dans les filons et veines d'origine hydrothermale de moyenne et basse température.



Célestine, SrSO₄

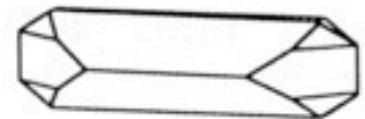
Groupe des sulfates anhydres

Système orthorhombique

Poids spécifique 3.9

Dureté 3.5

Indice de réfraction 1.62 à 1.63



Formes naturelles

Cristaux prismatiques ou tabulaires, voire aciculaires. Souvent en masses granulaires.

Propriétés physiques

Blanc gris à gris bleuté, éclat vitreux. Parfois en veines fibreuses.

Gisements

Dans des cavités de certaines roches sédimentaires. Très rarement dans les filons et veines d'origine hydrothermale.



Anglésite, $PbSO_4$

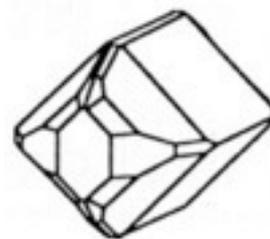
Groupe des sulfates anhydres

Système orthorhombique

Poids spécifique 6.3

Dureté 3

Indice de réfraction 1.88 à 1.89



Formes naturelles

Cristaux prismatiques courts, parfois tabulaires.
En croûtes cristallisées sur la galène.

Propriétés physiques

Incolore, gris, jaunâtre, éclat adamantin

Gisements

Dans les filons et veines d'origine hydrothermale de moyenne et basse température.



Gypse, $CaSO_4 \cdot 2H_2O$

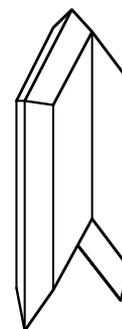
Groupe des sulfates hydratés

Système monoclinique

Poids spécifique 2.3

Dureté 2

Indice de réfraction 1.52 à 1.53



macle "en fer de lance"

Formes naturelles

Cristaux allongés, aplatis, à symétrie monoclinique bien visible.
Agrégats lenticulaires en "roses des sables", masses fibreuses.

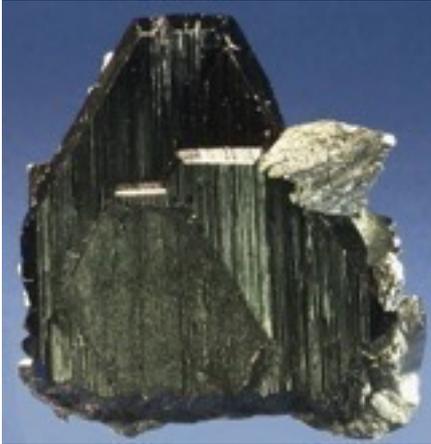
Propriétés physiques

Transparent à opaque, incolore, gris brun, jaunâtre, éclat vitreux à soyeux. Clivage parfait très facile, macle en "fer de lance".

Gisements

Dans les roches sédimentaires issues d'anciens bassins lagunaires riches en sels et dans les lacs salés en voie d'évaporation.

Classe des wolframates, $[WO_4]$



Wolframite, $FeMn(WO_4)$

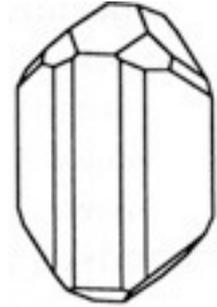
Classe des Wolframates

Système monoclinique

Poids spécifique 7.3

Dureté 4.5

Indice de réfraction 2.17 à 2.32



Formes naturelles

Série isomorphe allant de l'Huebnerite $MnWO_4$ à la Ferberite $FeWO_4$.
Prismes trapus ou tabulaires, striés dans le sens de l'allongement.

Propriétés physiques

Gris noir, opaque, éclat submétallique

Gisements

Filons hydrothermaux de moyenne et haute température ainsi que dans les pegmatites.



Crocoïse, $Pb(CrO_4)$

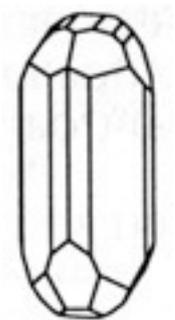
Classe des chromates

Système monoclinique

Poids spécifique 6.0

Dureté 2.5

Indice de réfraction 2.3 à 2.4



Formes naturelles

Prismes allongés.

Propriétés physiques

Rouge orangé, éclat adamantin.

Gisements

Dans la zone d'oxydation des gîtes de plomb.

Classe des phosphates, $[\text{PO}_4]$, $[\text{VO}_4]$



Apatite, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH}, \text{Cl}, \text{F})$

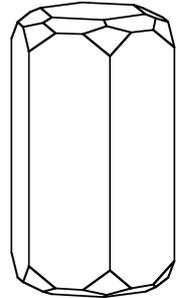
Groupe des phosphates anhydres

Système hexagonal

Poids spécifique 3.1

Dureté 5

Indice de réfraction 1.63



Formes naturelles

Cristaux prismatiques à symétrie hexagonale reconnaissable.

Propriétés physiques

Transparent à translucide, incolore, jaunâtre, bleu, vert, éclat vitreux.

Gisements

Dans les roches éruptives, les pegmatites, les filons hydrothermaux de haute température. Dépôts amorphes dans certaines roches sédimentaires.



Pyromorphite, $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$

Groupe des phosphates anhydres

Système hexagonal

Poids spécifique 6.7 à 7.1

Dureté 4

Indice de réfraction 2.05



Formes naturelles

Prismes trapus en forme de tonneau.

Propriétés physiques

Brun-orange, vert jaunâtre, éclat résineux à subadamantin.

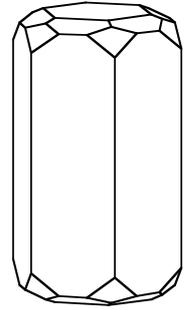
Gisements

Dans la zone d'oxydation des gîtes de plomb.



Vanadinite, $Pb_5(VO_4)_3Cl$

Groupe des vanadates	
Système hexagonal	
Poids spécifique	6.7 à 7.1
Dureté	3
Indice de réfraction	2.3



<i>Formes naturelles</i>	<i>Cristaux prismatiques allongés. Formes parfois squelettique à symétrie hexagonale reconnaissable.</i>
<i>Propriétés physiques</i>	<i>Orange brillant à brun rouge, éclat adamantin.</i>
<i>Gisements</i>	<i>Dans la zone d'oxydation des gîtes de plomb.</i>



Turquoise, $CuAl_6(PO_4)_4(OH)_8 \cdot 5H_2O$

Groupe des phosphates basiques	
Système triclinique	
Poids spécifique	2.7
Dureté	5.5
Indice de réfraction	1.61 à 1.65

<i>Formes naturelles</i>	<i>Masses cryptocristallines, concrétions, petits filons.</i>
<i>Propriétés physiques</i>	<i>Bleu-vert, pâle à foncé, éclat cireux à gras.</i>
<i>Gisements</i>	<i>Zone d'altération superficielle en liaison avec des imprégnations de cuivre.</i>

Classe des nésosilicates, $[\text{SiO}_4]$



Zircon, ZrSiO_4

Groupe du zircon

Système quadratique

Poids spécifique 4.5

Dureté 7.5

Indice de réfraction 1.95 à 2.0



Formes naturelles

Prisme quadratique terminé par des bipyramides.

Propriétés physiques

Incolore ou souvent teinté en gris, jaune ou brun, éclat résineux à adamantin. Renferme toujours un peu d'uranium.

Gisements

Minéral accessoire des roches éruptives. Parfois dans les pegmatites.



Olivine, $(\text{Fe},\text{Mg})_2\text{SiO}_4$

Groupe de l'olivine

Système orthorhombique

Poids spécifique 3.5

Dureté 6.5

Indice de réfraction 1.64 à 1.68



L'olivine est un terme intermédiaire de la série fayalite-forstérite (Fe_2SiO_4 - Mg_2SiO_4).

Formes naturelles

En masses grenues, très rares cristaux prismatiques.

Propriétés physiques

Transparent à translucide, vert jaunâtre, éclat vitreux.

Gisements

Dans les roches magmatiques basiques.



Disthène, $Al_2O_5 [SiO_4]$

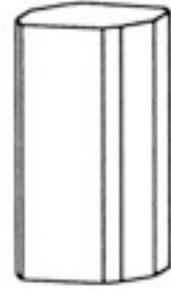
Groupe des silicates d'alumine.

Système triclinique

Poids spécifique 3.6

Dureté 4 à 7.5

Indice de réfraction 1.72



Formes naturelles Prismes aplatis, cristaux lamellaires.

Propriétés physiques Transparent à translucide, bleu clair à éclat nacré, parfois gris bleu à éclat terne. Dureté 4 dans le sens de l'allongement, 7.5 perpendiculairement à l'allongement, clivage parfait.

Gisements Dans les roches métamorphiques de haute pression.



Staurotide, $Fe_2Al_8O_4(SiO_4)_4(OH)_4$

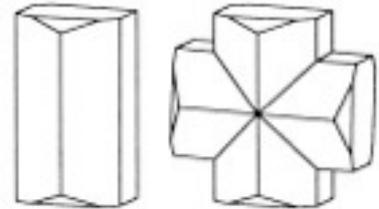
Groupe des silicates d'alumine

Système orthorhombique

Poids spécifique 3.6

Dureté 7 à 7.5

Indice de réfraction 1.75



Formes naturelles Prismes courts, macles «en croix» fréquente

Propriétés physiques Gris à brun foncé, rarement transparent, éclat résineux.

Gisements Dans les roches métamorphiques de haute température et dans les roches de contact.



Topaze, $Al_2(SiO_4)(F,OH)_2$

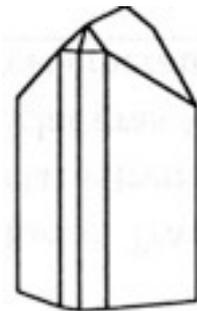
Groupe des silicates d'alumine

Système orthorhombique

Poids spécifique 3.6

Dureté 8

Indice de réfraction 1.61 à 1.64



Formes naturelles Cristaux prismatiques

Propriétés physiques Transparent à translucide, incolore, bleu clair à jaune verdâtre, brun à orange (madère), éclat vitreux. Clivage basal parfait.

Gisements Dans les pegmatites et dans quelques filons hydrothermaux de haute température.



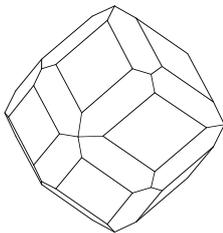
Groupe des grenats, $X_3Y_2 [SiO_4]_3$

Système cubique

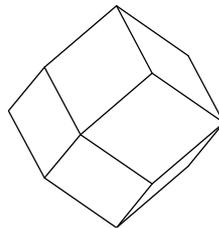
Poids spécifique 3.6 à 4.2

Dureté 6.5 - 7.5

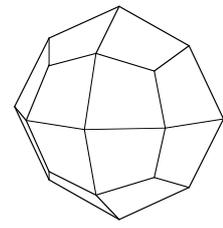
Indice de réfraction 1.74 à 1.89



Dodécaèdre



Trapézoèdre



Dodécaèdre +Trapézoèdre

Les grenats constituent une famille homogène de composition $X_3 Y_2 (SiO_4)_3$. Dans la structure atomique du minéral, la position X peut être occupée par Mg, Fe ou Ca et celle de Y par Al, Fe ou Cr.

Pyrope	$Mg_3Al_2(SiO_4)_3$	rouge sombre
Almandin	$Fe_3Al_2 (SiO_4)_3$	rouge sombre
Grossulaire	$Ca_3Al_2 (SiO_4)_3$	toutes couleurs
Spessartine	$Mn_3Al_2 (SiO_4)_3$	rouge orangé
Andradite	$Ca_3Fe_2 (SiO_4)_3$	vert à noir
Ouvarovite	$Ca_3Cr_2 (SiO_4)_3$	vert

Formes naturelles Toujours bien cristallisé sous forme de dodécaèdre, trapézoèdre ou formes composées.

Propriétés physiques Transparent à opaque, brun à noir, rouge, orange, vert, éclat vitreux à gras.

Gisements Dans les pegmatites et les roches métamorphiques.

Classe des sorosilicates, $[\text{Si}_2\text{O}_7]$



Epidote $\text{Ca}_2(\text{Al,Fe})_3\text{O}(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})$

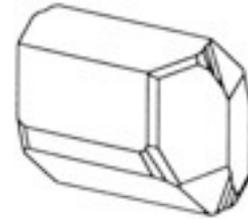
Groupe de l'épidote

Système monoclinique

Poids spécifique 3.5

Dureté 6

Indice de réfraction 1.73



Formes naturelles

Prisme trapu ou allongé, voire même aciculaire.

Propriétés physiques

Translucide à opaque, vert pâle à vert foncé, presque noir, éclat vitreux. La variation de la proportion Al//Fe influence sur la couleur qui devient d'autant plus foncée que la teneur en fer augmente.

Gisements

Dans les roches métamorphiques de faible intensité.

Classe des cyclosilicates, $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$



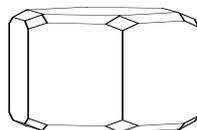
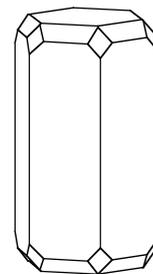
Béryl $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$

Système hexagonal

Poids spécifique 2.7 à 2.9

Dureté 7 - 7.5

Indice de réfraction 1.56 à 1.59



Formes naturelles

Prisme hexagonal trapu à allongé voire même aciculaires, parfois tabulaire, les faces du prisme sont parfois striées verticalement.

Propriétés physiques

Les formes prismatiques allongées caractérisent les variétés vertes et bleues. Le béryl rose montre des prismes peu allongés semblables à des petits tambours et le béryl incolore est parfaitement tabulaire.

Gisements

Roches éruptives riches en silice, pegmatites, filons hydrothermaux de haute température, roches métamorphiques.



Tourmaline,



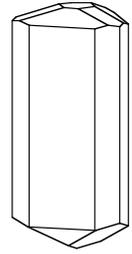
Système rhomboédrique

Poids spécifique 3.0 à 3.20

Dureté 7 - 7.5

Indice de réfraction 1.62 à 1.64

Variétés : Dravite (noir),
Elbaïte (rose, jaune, bleu)



section ditrigonale



Formes naturelles

Prisme allongé de section ditrigonale, terminé par un rhomboèdre; les faces prismatiques sont striées verticalement.

Propriétés physiques

Transparent à translucide dans toutes les couleurs: rose, rouge, vert, bleu, noir, parfois bicolore.

Gisements

Dans les roches granitiques, les gneiss et les pegmatites.

La composition chimique de la tourmaline est variable. Les atomes de Fe, Mg, Li et Al sont interchangeables. Cela explique la grande diversité des couleurs que peut prendre ce minéral.

Classe des inosilicates, $[Si_2O_6]$



Diopside $CaMg(Si_2O_6)$

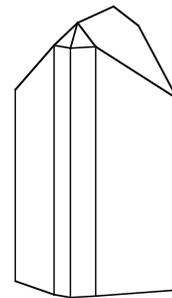
Groupe des pyroxènes

Système monoclinique

Poids spécifique 3.3

Dureté 6

Indice de réfraction 1.67 à 1.69



Formes naturelles

Prismes trapus rares, généralement en bâtonnets courts, masses grenues compactes.

Propriétés physiques

Rarement incolore, ordinairement vert terne, éclat vitreux.

Gisements

Dans les roches magmatiques basiques et dans les roches métamorphiques de contact.



Augite $\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg},\text{Al}) [(\text{Si},\text{Al})_2\text{O}_6]$

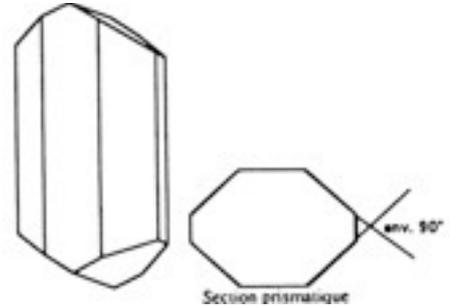
Groupe des pyroxènes

Système monoclinique

Poids spécifique 3.5

Dureté 5.5

Indice de réfr. 1.67 à 1.69



Formes naturelles

Prismes courts avec clivage $\{110\}$ à 90° l'un de l'autre.

Propriétés physiques

Noir, éclat cireux.

Gisements

Dans les roches magmatiques basiques et dans les roches métamorphiques de contact.



Spodumène $\text{LiAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)$

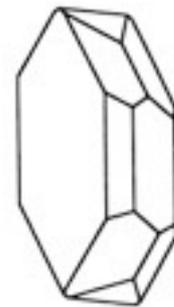
Groupe des pyroxènes

Système monoclinique

Poids spécifique 3.0 à 3.2

Dureté 7

Indice de réfraction 1.74



Formes naturelles

Cristaux prismatiques aplatis, stries sur les faces verticales.

Propriétés physiques

Transparent à translucide, incolore, rose-mauve (var. kunzite), vert (var. hiddenite).

Gisements

Dans les pegmatites granitiques.



Hornblende, $\text{NaCa}_2(\text{Mg,Fe,Al})_5[(\text{Si,Al})_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$

Groupe des amphiboles

Système monoclinique

Poids spécifique 3.0 à 3.5

Dureté 5 à 6

Indice de réfraction 1.74



Formes naturelles

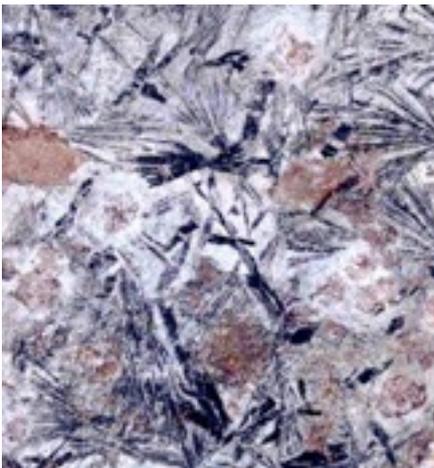
Prisme à section losangique.

Propriétés physiques

Vert foncé à noir, éclat vitreux à résineux.

Gisements

Minéral constitutif de beaucoup de roches éruptives pauvres en silice. Fréquent dans les roches métamorphiques.



Actinote, $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5(\text{Si}_4\text{O}_{11})_2(\text{OH})_2$

Groupe des amphiboles

Système monoclinique

Poids spécifique 3.1 à 3.4

Dureté 5 à 6

Indice de réfraction 1.74



Formes naturelles

Longs prismes en agrégats parallèles ou rayonnants.

Propriétés physiques

Vert foncé à noir, éclat vitreux.

Gisements

Dans les schistes métamorphiques de faible température.



Asbeste

L'asbeste (ou amiante) réunit les variétés fibreuses d'actinote, de chrysotile et de riebeckite.

Classe des phyllosilicates, $[Si_4O_{10}]$



Talc, $Mg_3(Si_4O_{10})(OH)_2$

Groupe du talc

Système monoclinique

Poids spécifique 2.7 à 2.8

Dureté 1

Indice de réfraction 1.54 à 1.59

Formes naturelles

Cristaux feuilletés ou masses compacte.

Propriétés physiques

Vert-pâle à blanc, toucher onctueux

Gisements

Produit d'altération hydrothermale dans les roches ultrabasiques riches en magnésie.



Muscovite $KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2$

Groupe des micas

Système monoclinique

Poids spécifique 2.8 à 2.9

Dureté 2.5 à 3

Indice de réfraction 1.57 à 1.61



Formes naturelles

Cristaux tabulaires à section pseudo-hexagonale se débitant en feuillets, en paillettes.

Propriétés physiques

Transparent en feuillets minces, incolore à beige, éclat nacré, souvent très brillant. Clivage très facile avec débit en feuillets souples. Rayable à l'angle.

Gisements

Dans les roches métamorphiques, en particulier les gneiss. Dans les pegmatites.



Biotite $K(Mg,Fe)_3[AlSi_3O_{10}](OH)_2$

Groupe des micas

Système hexagonal

Poids spécifique 2.7 à 2.9

Dureté 2.5 à 3

Indice de réfraction 1.56 à 1.59



Formes naturelles

Cristaux tabulaires à section pseudo-hexagonale se débitant en feuillets, en paillettes.

Propriétés physiques

Transparent en feuillets minces, noir, éclat nacré, souvent très brillant. Clivage très facile avec débit en feuillets souples. Rayable à l'ongle.

Gisements

Dans les roches granitiques, les gneiss et les pegmatites.

Classe des tectosilicates, $[Si_4O_8]$ ou $[AlSi_3O_8]$



Orthose $K[Al Si_3O_8]$

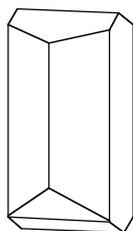
Groupe des feldspaths alcalins

Système monoclinique

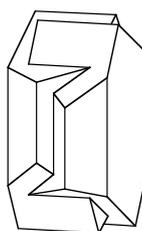
Poids spécifique 2.57

Dureté 6

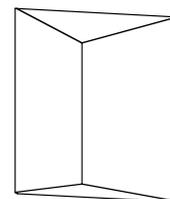
Indice de réfraction 1.54



macle dite "de Carlsbad"



forme de l'Adulaire



Formes naturelles

Prisme court à section rectangulaire, parfois masse clivable, macles fréquentes par interpénétration.

Propriétés physiques

Rarement translucide, plus généralement opaque, blanc laiteux, jaunâtre, rose, parfois éclat nacré. Clivage parfait. C'est le minéral le plus abondant de la croûte terrestre. La variété Adulaire se trouve dans les fissures alpines.

Gisements

Principal constituant des granites, des gneiss et des pegmatites, filons hydrothermaux.



Albite $\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$

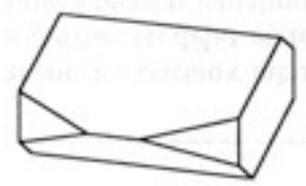
Groupe des feldspaths alcalins

Système triclinique

Poids spécifique 2.62

Dureté 6

Indice de réfraction 1.53



Formes naturelles

Cristaux rares, tabulaires, un peu comme l'orthose. Parfois en feuillets (variété Cleavelandite).

Propriétés physiques

Translucide à opaque, incolore, gris, blanc laiteux, éclat vitreux.

Gisements

Dans les roches éruptives et métamorphiques, les filons hydrothermaux et les pegmatites, dans les fissures alpines par activité hydrothermale.



Leucite $\text{K}(\text{AlSi}_2\text{O}_6)$

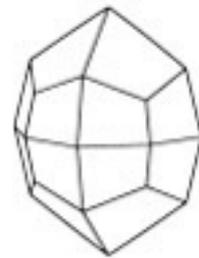
Groupe des feldspathoïdes

Système quadratique

Poids spécifique 2.4

Dureté 5.5

Indice de réfraction 1.51



Formes naturelles

Beaux trapézoédres.

Propriétés physiques

Blanc laiteux, éclat terne.

Gisements

Dans certaines laves riches en potassium.



Scolécite $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10})\cdot 3\text{H}_2\text{O}$

Groupe des zéolites

Système monoclinique

Poids spécifique 2.3

Dureté 5.5

Indice de réfraction 1.53

Formes naturelles

En baguettes aciculaires, souvent fibro-radiées.

Propriétés physiques

Incolore à blanc, éclat vitreux, aspect soyeux pour les masses fibreuses.

Gisements

En dépôt hydrothermal dans les vacuoles et géodes des roches basaltiques.



Stilbite $\text{Ca}(\text{Al}_2\text{Si}_7\text{O}_{18})\cdot 7\text{H}_2\text{O}$

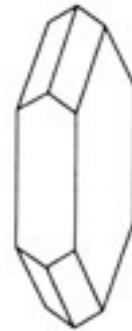
Groupe des zéolites

Système monoclinique

Poids spécifique 2.25

Dureté 4

Indice de réfraction 1.50



Formes naturelles

Cristaux prismatiques de section rhombique disposés en gerbes souvent fibro-radiées.

Propriétés physiques

Blanc, jaunâtre, éclat vitreux.

Gisements

En dépôt hydrothermal dans les vacuoles et géodes des roches basaltiques.

Glossaire

Anion	Atome ionisé, porteur d'une ou plusieurs charges électriques négatives.
Anisotrope	Dont les propriétés ont des grandeurs variables suivant la direction.
Axe de symétrie	Opérateur de symétrie répétant les éléments d'un objet n fois (2, 3, 4 ou 6 en ce qui concerne le monde cristallin) par rotation autour d'un axe imaginaire dit "d'ordre n ".
Axe hélicoïdal	Opérateur de symétrie double qui associe un axe à une translation le long de l'axe. N'existe qu'en symétrie spatiale.
Axe inverse	Opérateur de symétrie double associant un axe à un centre d'inversion. Seul l'axe inverse d'ordre 4 possède une identité propre.
Biréfringence	Propriété des minéraux de présenter des indices de réfraction variables compris entre deux valeurs extrêmes. La différence entre les deux indices extrêmes est définie comme la biréfringence.
Bipyramide	Deux pyramides accolées par leur base.
Bisphénoïde	Déformation quadratique ou orthorhombique du tétraèdre.
Cation	Atome ionisé porteur d'une ou plusieurs charges électriques positives.
Centre d'inversion	Opérateur de symétrie dédoublant les éléments d'un objet par inversion de part et d'autre de ce centre et à égale distance de celui-ci.
Classe de symétrie	Combinaison d'opérateurs de symétrie caractérisant une forme cristalline. Il existe 32 manières de combiner ces opérateurs : ce sont les 32 classes de symétrie du monde minéral.
Clivage	Propriété qu'ont certains minéraux de se débiter selon des plans de moindre résistance mécanique dont l'orientation correspond à des zones de faiblesse de la structure cristalline.
Cube	Polyèdre à six faces équivalentes de forme carrée, perpendiculaires les unes aux autres. On l'appelle parfois "hexaèdre".
Cubique	Qualifie une symétrie dérivant du cube. Système cristallin du même nom.
Deltoïde	En forme de delta.
Densité	Nombre sans unité qui exprime le poids spécifique d'un corps relativement à celui de l'eau.
Dihexagonal (e)	Qualifie une section hexagonale dont chaque côté a été remplacé par un segment brisé.
Ditétragonal (e)	Qualifie une section carrée dont chaque côté a été remplacé par un segment brisé.
Ditrigonal (e)	Qualifie une section triangulaire dont chaque côté a été remplacé par un segment brisé.
Dodécaèdre	Maille élémentaire Polyèdre imaginaire qui matérialise la loi de translation du motif dans l'espace. La maille est simple ou multiple suivant qu'elle contient un ou plusieurs motifs.
Mériédrie	Forme cristalline ne possédant que la moitié, voire le quart des éléments de symétrie d'un système cristallin.
Minerai	Terme de mineur désignant l'ensemble de minéraux utiles à l'industrie.
Molécule constituante	"Brique élémentaire" imaginée par Haüy pour expliquer l'orientation des faces des cristaux.
Monoclinique	Qualifie une symétrie dérivant du prisme oblique à base rectangle, prisme incliné sur une seule de ses arêtes. Système cristallin du même nom.
Motif	Le plus petit groupement d'atomes qui, répété indéfiniment dans les trois directions de l'espace, constitue un minéral.
Octaèdre	Polyèdre à 8 faces équivalentes, obtenu par troncature des huit sommets du cube.

<i>Opérateur de symétrie</i>	<i>Entité géométrique (plan, axe, point...) entraînant la répétition des éléments d'un objet.</i>
<i>Orthorhombique</i>	<i>Qualifie une symétrie dérivant du prisme droit à base rectangle¹⁵. Système cristallin du même nom.</i>
<i>Plan de symétrie</i>	<i>Opérateur de symétrie dédoublant les éléments d'un objet à la manière d'un miroir.</i>
<i>Plan avec glissement</i>	<i>Opération de symétrie qui associe la réflexion à une translation. N'existe qu'en symétrie spatiale.</i>
<i>Parallélépipède</i>	<i>Mot horrible et difficile à prononcer qui désigne un solide à six faces dont les arêtes et les faces sont parallèles deux à deux.</i>
<i>Pegmatite</i>	<i>Roche caractérisée par des minéraux de très grande taille, se développant parfois dans les parties marginales des massifs éruptifs.</i>
<i>Pédion</i>	<i>Une face unique non répétée par les opérateurs de symétrie (la base d'une pyramide, par exemple).</i>
<i>Pinacoïde</i>	<i>Deux faces équivalentes parallèles (les bases d'un prisme par exemple).</i>
<i>Poids spécifique</i>	<i>Poids d'une unité de volume d'un corps [g/cm³].</i>
<i>Polymorphisme</i>	<i>Particularité d'une substance chimique de cristalliser dans des structures cristallines différentes selon les conditions de cristallisation.</i>
<i>Prisme</i>	<i>Ensemble de faces équivalentes toutes parallèles à un même axe.</i>
<i>Pseudomorphose</i>	<i>Se dit d'un minéral dont la forme est "empruntée" à celle d'un autre.</i>
<i>Pyramide</i>	<i>Ensemble de faces équivalentes dont les arêtes convergent vers un même point situé sur un axe principal.</i>
<i>Quadratique</i>	<i>Qualifie une symétrie dérivant du prisme droit à base carrée. Système cristallin du même nom. Synonyme de tétragonal.</i>
<i>Rayons X</i>	<i>Onde électromagnétique dont la longueur d'onde est du même ordre de grandeur que les distances qui séparent les atomes les uns des autres.</i>
<i>Réfraction</i>	<i>Déviation que subit un rayon lumineux en traversant la limite de séparation de deux corps transparents d'indices différents.</i>
<i>Réseau cristallin</i>	<i>Réseau de droites parallèles à trois directions de l'espace dont les intersections définissent la maille élémentaire</i>
<i>Rhombe</i>	<i>Racine grecque désignant un losange.</i>
<i>Rhomboèdre</i>	<i>Bipyramide trigonale dont une des pyramides a tourné de 60° par rapport à l'autre autour de l'axe principal. On peut aussi le définir aussi comme un polyèdre formé de 6 losanges (rhombes) parallèles deux à deux.</i>
<i>Rhomboédrique</i>	<i>Qualifie une symétrie dérivant du rhomboèdre. Système cristallin du même nom.</i>
<i>Rhomboïdal</i>	<i>Qui a une forme de "rhombe" (équivalent grec de "losange").</i>
<i>Scalénoèdre ditrigonal</i>	<i>Bipyramide ditrigonale dont une des pyramides a tourné de 60° autour de l'axe commun.</i>
<i>Scalénoèdre ditétragonal</i>	<i>Bipyramide ditétragonale dont une des pyramides a tourné de 45° autour de l'axe commun.</i>
<i>Sphénoèdre</i>	<i>Synonyme de bisphénoïde chez certains auteurs.</i>
<i>Symétrie</i>	<i>Géométrie qui décrit les lois de répétition des parties d'un ensemble.</i>
<i>Symétrie ponctuelle</i>	<i>Lois de symétrie dont les opérateurs passent tous par un point commun, au centre de la forme.</i>
<i>Symétrie spatiale</i>	<i>Symétrie dont les opérateurs ne passent pas tous par un point commun et qui se distingue de la symétrie ponctuelle par l'adjonction de la notion de translation.</i>
<i>Système cristallin</i>	<i>Ensemble regroupant toutes les formes géométriques dont la symétrie se rapporte à l'un des sept parallélépipèdes pouvant remplir jointivement tout l'espace.</i>

15 Originellement il s'agissait d'un prisme droit à base losange (rhombe).

<i>Tétraèdre</i>	<i>Polyèdre constitué de 4 faces triangulaires équilatérales.</i>
<i>Tétragonal(e)</i>	<i>Adjectif qualifiant un objet dont la section est un carré. Utilisé parfois en lieu et place de quadratique. Système cristallin du même nom.</i>
<i>Translation</i>	<i>Opération de symétrie qui consiste à déplacer un groupe d'objets dans une certaine direction.</i>
<i>Trapézoèdre</i>	<i>Bipyramide dont une des pyramides a tourné d'un angle quelconque autour de l'axe commun. Dans le système cubique c'est un polyèdre à 24 faces.</i>
<i>Triakisoctaèdre</i>	<i>Forme à 24 faces équivalentes, analogue à un octaèdre dont les faces auraient été remplacées par des pyramides obtuses à trois pans.</i>
<i>Triclinique</i>	<i>Qualifie une forme dérivant du prisme oblique à base parallélogramme, incliné sur ses trois arêtes. Système cristallin du même nom.</i>
<i>Trigonal(e)</i>	<i>Adjectif qualifiant un objet dont la section est un triangle équilatéral. Les cristallographie utilisent ce terme en lieu et place de rhomboédrique.</i>
