

## **Les Macles dans les Minéraux**

Dr. Alain ABREAL

### **Sujet :**

*Si l'on ouvre un guide ou une encyclopédie sur les minéraux, il n'est pas rare d'y découvrir dans les premières pages quelques « allusions » aux phénomènes cristallographiques que sont les macles. « Allusions » car, bien que ce soient des particularités de la nature, avec un intérêt minéralogiste et esthétique de premier plan, le paragraphe relatif aux macles n'est que peu développé.*

*Vous pouvez rétorquer que les macles ne sont pas très représentées dans la nature. Pourtant la grande majorité des cristaux de quartz sont maclés, comme nous le découvrirons ultérieurement bien que cela ne nous soit pas perceptible visuellement ( les cristaux non maclés étant très marginaux).*

*En outre, la plupart des minéraux peuvent former des macles, hormis peut-être le béryl et l'axinite.*

*La connaissance des macles permet donc de distinguer dans un amas de cristaux, s'il s'agit de « simples » enchevêtrements de cristaux, ou de véritables macles, et de définir ainsi l'intérêt cristallographique d'un échantillon.*

*Alors, macles ou pas macles ?*

### **Abstract :**

*When you open a book or an encyclopedia on minerals, probably you find some pages treating of the original shapes the twins are. In spite of the optical and mineralogical interests of the twins, we must note the few of description and studies shown about them.*

*Indeed, you can answer the twinned minerals are not frequently found in the nature. However, the great majority of quartz crystals are twinned as you will discover in later although it is not perceptible for us visually.*

*Moreover, most of the minerals can form twin shapes, except perhaps the axinite whose we do not have yet discovered any twin.*

*Also, the twins knowledge allows us to distinguish in a pile of crystals if they are either a simple tangle or a true twin, and thus to determine the mineralogical and crystallographic interest of a sample.*

*Thus, twin or not twin?*

## 1. INTRODUCTION

Si l'on ouvre un guide ou une encyclopédie sur les minéraux, il n'est pas rare d'y découvrir dans les premières pages quelques « allusions » aux phénomènes cristallographiques que sont les macles.

« Allusions » car, bien que ce soient des particularités de la nature, avec un intérêt minéralogiste et esthétique de premier plan, le paragraphe relatif aux macles n'est que peu développé.

Vous pouvez rétorquer que les macles ne sont pas très représentées dans la nature. Pourtant la grande majorité des cristaux de quartz sont maclés, comme nous le découvrirons ultérieurement bien que cela ne nous soit pas perceptible visuellement ( les cristaux non maclés étant très marginaux).

En outre, la plupart des minéraux peuvent former des macles, hormis peut-être le béryl et l'axinite.

La connaissance des macles permet donc de distinguer dans un amas de cristaux, s'il s'agit de « simples » enchevêtrements de cristaux, ou de véritables macles, et de définir ainsi l'intérêt cristallographique d'un échantillon.

Alors, macles ou pas macles ?



Fig.1a : cristaux d'augite de l'Yssingelais (2 cm)



Fig 1 b : cristaux d'émeraude (3 cm)

## 2. DEFINITION

Pour répondre à la question précédente si les cristaux présentés ci-dessus (fig.1), des *cristaux d'augite et d'émeraude* constituent des macles ou pas, il convient de bien définir avant tout ce qu'est une macle.

Voici deux définitions, aussi générale l'une que l'autre mais qui ont le mérite de montrer le paradoxe qu'il peut y avoir entre la simplicité de la réalité de la macle, et la complexité qu'elle peut engendrer dans sa description si ce n'est déjà dans son observation. Ce sont les définitions des principaux minéralogistes dont j'ai utilisé les travaux :

Henri-Jean SCHUBNEL (1): « On appelle « macle » le groupement de deux ou de plusieurs cristaux de même nature suivant des lois déterminées. » Mais il s'empresse de rajouter : « Cependant, dans la nature, les cristaux apparaissent souvent étroitement imbriqués les uns dans les autres, leurs orientations mutuelles étant quelconques. De tels accolements sont dus au hasard et ne doivent pas être confondus avec des macles. »

Emmanuel FRITSCH (2-4): « Une macle est l'association, suivant des lois géométriques bien définies, de deux individus d'une même espèce minérale. Elle est due à l'existence d'un réseau commun (ou presque commun) aux deux cristaux d'orientations différentes. »

### 3. PRESENTATION DE QUELQUES NOTIONS

Bien que ce soit largement développé dans la suite de cet exposé, il est fondamental d'avoir bien à l'esprit qu'une macle n'est pas une juxtaposition de cristaux comme l'entendent souvent les américains mais bel et bien un seul cristal qui a formé deux ou plusieurs individus à la suite de défauts de croissance lors de sa cristallisation.

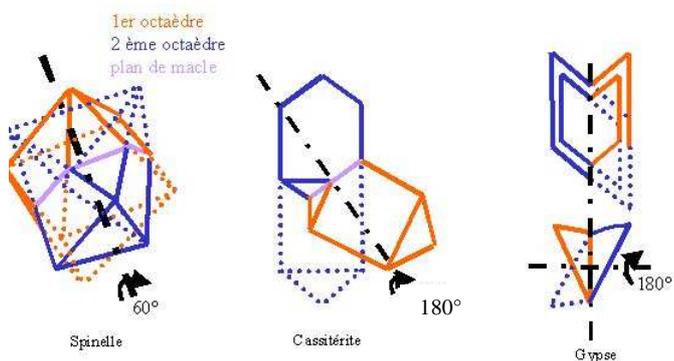


Fig. 2 : Exemples de macles par accolements

La figure 2 présentent quelques macles typiques de macles par accolements. Nous voyons comment lors de sa croissance, un cristal a vu celle-ci changer de direction.

La macle de la spinelle, macle typique du système cubique, est due à la cristallisation de deux 1/2 octaèdres (bleu et orange) autour de la diagonale (axe ternaire du cube).

La macle en genou de la cassitérite et les macles en fer de lance et en queue d'hirondelle du gypse présentent également le même profil de « déviation » d'une partie du cristal isolé complet.

Les macles par interpénétration peuvent être représentées schématiquement par deux individus qui ont la même forme mais avec des éléments de symétrie différents de sorte que si l'on tourne la macle autour d'un axe de symétrie on trouve l'autre individu, identique au premier.

La macle en croix de fer de la pyrite sur la figure 3 montre en trait plein le dodécagone pentagonal de base de la macle. Mais la cristallisation simultanée de deux individus en rotation l'un par rapport à l'autre de 180°, conduit à cette forme particulière de macle par interpénétration.

Les macles de la fluorine montrent également ce type de macle avec deux individus qui semblent avoir cristalliser indépendamment l'un de l'autre mais dans le même espace, avec ses deux cubes (gris clair et gris foncé) qui en réalité ne forment qu'un seul cristal.

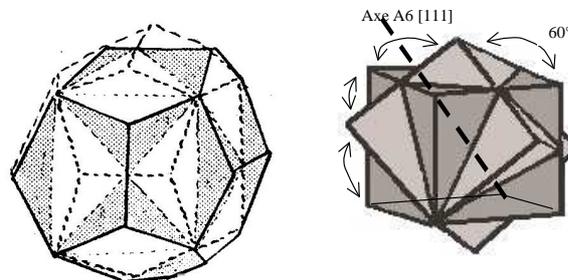


Fig. 3 : Exemples de macle par interpénétration  
a) croix de fer de la pyrite b) fluorine.

### 4. LOIS CRISTALLOGRAPHIQUES ET ENERGETIQUES

Ainsi, il est simultanément question d'espèce minérale, et de géométrie, les fondamentaux de la cristallographie. C'est pourquoi, l'étude des macles est corrélée à l'observation des cristaux, à la détermination des angles des faces, en corrélation avec la chimie et à la structure élémentaire du composé.

En effet, il convient de rappeler ici les lois fondamentales de la cristallographie :

- Loi de la constance des angles de Sténon et Romé de Lisle :  
« Dans une même espèce cristalline, l'angle dièdre de faces correspondantes est constant. »  
De sorte qu'un monocristal croissant sans gênes externes formera toujours un polyèdre convexe limité par des faces planes.
- Loi de stratification multiple d'Haüy :  
« Un cristal d'une même espèce est constitué, quel que soit son faciès, par la juxtaposition de parallélépipèdes élémentaires, tous identiques entre eux et caractéristiques de l'espèce. »

Ces lois, déduites de l'observation de minéralogistes avertis et rigoureux, au fort pouvoir de déduction, satisfont d'un point de vue géométrique aux lois énergétiques qui régissent les

cristaux. Or, tout système physico-chimique tend à minimiser son énergie potentielle, c'est à dire, à minimiser son énergie interne vers une position d'équilibre stable (5). C'est la loi de Curie : « Un corps tend à prendre la forme qui présente une énergie superficielle minimum compatible avec les forces orientantes. Ce minimum de l'énergie potentielle de surface introduit comme solution pour un volume donné celle qui fournit la surface minimum compatible avec les liaisons. »

Ce principe de minimisation de l'énergie pour tendre vers une position d'équilibre est universel. Il est également applicable à la situation des atomes, ions et molécules au sein même du cristal (dont la position des éléments est responsable de la géométrie macroscopique (Principe d'Haüy); en particulier pour l'énergie réticulaire de cohésion du cristal. Soit  $E_{rét}$  cette énergie réticulaire, c'est l'énergie qu'il faut fournir par mole, à ses ions, pris au repos, infiniment éloignés les uns les autres, pour reconstituer ce cristal.

En considérant en première approximation, que tous les cristaux sont ioniques, ce qui est loin d'être erroné puisque l'affinité électronique d'atomes comme le soufre, l'oxygène ou encore les halogénures (Cl, F) est suffisamment élevée pour attirer les électrons des éléments qui leurs sont associés (alcalins : Na, K, Cs ; alcalino-terreux : Ca, Mg, Ba ; métaux) dans leurs orbitales ; dans ce cas l'énergie réticulaire s'exprime sous la forme d'un terme d'attraction (ou énergie de Madelung) et d'un terme de répulsion.

Selon Born et Landé :

$$E_{rét} = \frac{q^+ q^- N_A A}{4 \pi \epsilon_0 s e} \left(1 - \frac{1}{n}\right)$$

où  $q^+$  et  $q^-$  sont les charges respectives des anions et des cations.

A : constante de Madelung

S : distance entre le cation et l'anion

$N_A$  : Nombre d'Avogadro

$\epsilon_0$  : permittivité du vide

n : coefficient de répulsion

On en déduit des courbes comme celles relatives à KCl, présentées en fig.4, où il apparaît

que la position d'équilibre d'un ion par rapport à un autre dans un cristal, ne supporte qu'une faible variation. D'où la rigueur géométrique exprimée dans les lois fondamentales de la cristallographie relativement à la géométrie des cristaux.

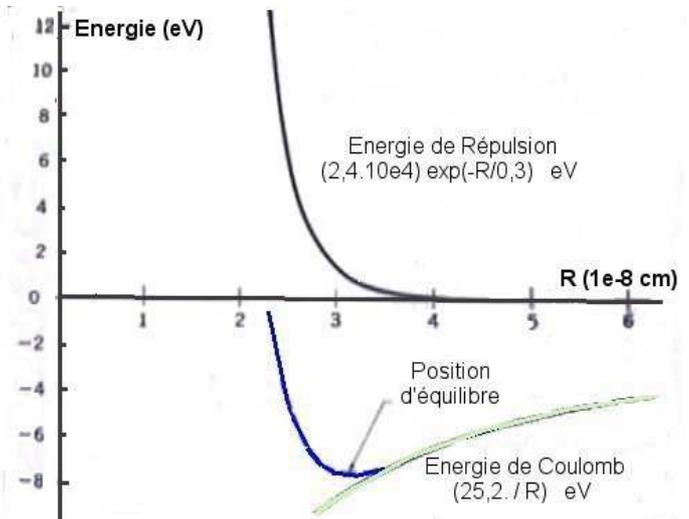


Fig. 4 : Energie par molécule du cristal de KCl, montrant les contributions de Madelung et de répulsion  
Détermination de la position d'équilibre (distance entre deux ions successifs)

Dans une macle, puisque ce sont les mêmes éléments qui sont présents que dans l'un des cristaux pris isolément, cette énergie réticulaire est toujours valable, à ceci près que la distance des plus proches voisins  $s$ , n'est plus la même et que  $n$  peut varier très localement (à la jonction entre les deux cristaux formant la macle). Mais l'expression reste de même nature, ce qui impose aux ions d'avoir une position définie.

Il en résulte que le positionnement des ions, et donc la géométrie macroscopique des macles est rigoureuse : c'est à dire que chaque minéral ne peut présenter que quelques types de macles, et que ces dernières peuvent être parfaitement définies.

*De sorte qu'il est possible de définir une liste de macles existantes pour chaque minéral, et d'éliminer certaines géométries observées macroscopiquement, qui ne correspondent pas à des énergies possibles ; il s'agit, généralement, d'accolements de cristaux de croissance parallèle.*

## 5. CRITERES D'EXISTENCE D'UNE MACLE

### 5.1. ANGLE RENTRANT

A ma connaissance, personne ne s'est intéressé de près à l'étude énergétique des macles. La distinction entre accolements et macles véritables est effectuée à partir de mesures d'angles (goniométrie) et de statistiques.

Ainsi, le premier critère de définition macroscopique de l'existence de la macle, est la présence d'un *angle rentrant* (fig. 5).

Toutefois d'après Baronnet (6), il convient de ne pas se limiter à ce seul critère, qui n'est ni nécessaire, ni suffisant.



fig. 5 : Angle rentrant dans une macle d'augite (Yssingaux 2 cm)

En effet, la formation de quartz non orientée par maclage entre deux cristaux gauche et droit (macle du Brésil (fig. 6 et 7)) ne crée pas d'angles rentrants.

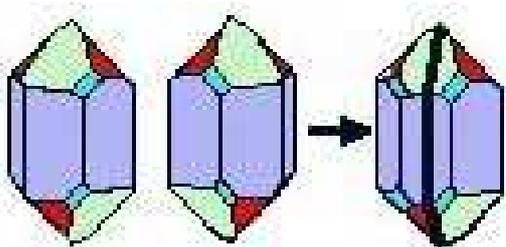


fig. 6 : formation d'un quartz maclé à partir d'un quartz droit et d'un quartz gauche (macle du Brésil)

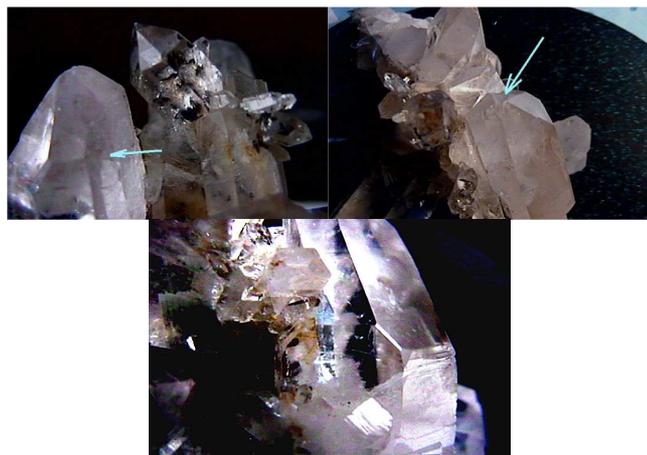


fig.7 : remarquez l'angle rentrant sur le gros cristal de quartz, ce "cristal" a tous les critères d'une macle : taille supérieure à ces voisins, forme très aplatie, angle rentrant et faces (6-1-51) et (51-61) présentes,

c'est une très belle mâle du Brésil dans un échantillon avec plusieurs quarts bi terminés de 10 cm.

De même, on peut observer des angles rentrants sur les groupements de cristaux parallèles ou quasi parallèles et sur les monocristaux squelettiques et dendritiques (fig. 8) bien qu'il ne s'agisse pas de macles.

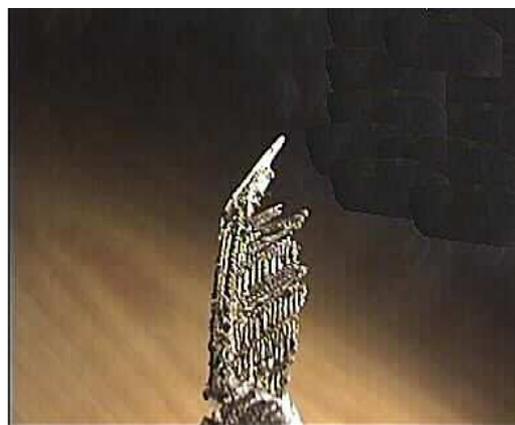


fig. 8 : dendrites d'Argent du Mexique (4 cm) Présence d'angles rentrants non liés à des macles

### 5.2 EXISTENCE STATISTIQUE

D'un point de vue microscopique, l'analyse par diffraction (rayons X, électrons), permet de définir les structures des macles. On obtient en effet, sur les clichés la superposition des réseaux réciproques des deux cristaux de la macle, ainsi que le réseau propre de celle-ci, c'est à dire les coïncidences entre les deux réseaux des éléments de la macle.

En revanche, pour nous, pauvres minéralogistes, qui ne disposons pas nécessairement des appareils derniers cris, qui par traitement informatiques nous restituent la structure réelle d'une macle, il convient de se rabattre sur son existence statistique.

A savoir, que c'est à partir de la fréquence de rencontre d'une géométrie particulière pour un minéral donné, que l'on peut définir qu'il s'agit bel et bien d'une macle.

### 5.3 AUTRES CRITERES

Les cristaux maclés sont généralement plus gros que les autres cristaux environnants (fluorine de Cumberland, quartz de la Gardette, calcite de Guanajuato). De plus, ils sont souvent aplatis parallèlement au plan de macle (parfois perpendiculairement)(quartz de la Gardette) (fig. 9), ou allongés suivant l'axe de macle. Enfin, on peut trouver sur les macles des faces qui n'existent pas sur les cristaux isolés (macle du Dauphiné ou du Brésil pour le quartz)(fig.7).



fig. 9 : Macle de quartz du japon ou de la Gardette (échantillon chinois de 8 cm: macle excessivement plate, avec un angle proche de  $120^\circ$  ( $116^\circ 12'$ ))

## 6. CLASSIFICATION DES MACLES

Il existe principalement trois types de classification :

- la classification géométrique définitivement établie par Friedel (1904 et 1919) qui considère

uniquement les positions respectives des réseaux des individus maclés et qui est la plus rigoureuse. Elle permet aussi de prévoir, dans une certaine mesure ; l'existence de la macle pour une espèce cristalline.

- la classification génétique qui permet de distinguer les macles à partir de leurs origines.
- la classification par morphologie, la plus facile à mettre en œuvre car basée sur l'observation.

### 6.1.CLASSIFICATION GEOMETRIQUE DES MACLES

#### 6.1.1. Principes et définitions

Deux cristaux de même nature, jointifs, forment une macle s'il y a concordance (ou quasi concordance) entre les réseaux de chacun de ces cristaux.

Le passage du réseau d'un individu à l'autre peut s'effectuer :

- soit par rotation autour d'une rangée du réseau, appelé *axe de la macle* (Romé de Lisle) ou d'*hémitropie* (Haüy).
- soit par réflexion par rapport à un plan réticulaire, appelé alors *plan de macle*.
- soit par inversion autour d'un point, *le centre de macle*.

Les macles se construisent donc à partir d'éléments de symétrie simples, de même types que le cristal pris isolément, et ce en conformité avec les lois de la cristallographie (cf 3.). On les appelle *éléments de macle*, constitués de centres de symétrie, de miroirs ou d'axes de rotations  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $A_4$ , ou  $A_6$ , *différents des éléments de symétrie des individus formant la macle*.

Les axes, plans ou centre de macle, ne peuvent pas en effet, être des éléments de symétrie de la classe du cristal isolé car alors il n'apporterait pas de symétrie autre que celles déjà existantes, c'est à dire que le cristal se superposerait à lui-même et ne constituerait pas alors une macle

*Ainsi, les macles possèdent très souvent des éléments de symétrie supérieurs aux cristaux pris seuls (sauf dans le cas de macle en V).*

Les axes binaires et les miroirs sont les éléments de macle les plus fréquents, par exemple :

- axe  $A_2$  parallèle à l'axe c pour la macle de Carlsbad de l'orthose
- miroir (100) pour la macle du gypse
- miroir (11-20) perpendiculaire aux  $A_2$ , de la mériédrie 32 du système rhomboédrique dans la macle du Brésil du quartz

Si le réseau du premier individu ne se prolonge pas rigoureusement dans le second cristal de la macle, il apparaît alors une certaine variation angulaire selon un axe ou plan réticulaire appelé **obliquité**. Ce défaut peut atteindre 3 à 4 °, jamais plus de 6°, car il s'accompagne de contraintes internes qui fragilisent le réseau cristallin de l'édifice.

Par comparaison entre les réseaux de la macle et ceux des cristaux, il apparaît que la maille élémentaire du cristal isolé peut être un sous-multiple de la maille définie pour la macle entière (fig. 10). On définit alors **l'indice de macle**, le nombre par lequel il faut multiplier le volume de la maille élémentaire pour obtenir celui de la maille du réseau continu.

Dans le cas de la macle de la fluorite, il est égal à 3. Plus il est élevé, moins le nombre de coïncidences de positions atomiques d'un cristal à l'autre est grande, et donc moins la macle est stable. L'indice de macle atteint souvent 5, mais est rarement supérieur.

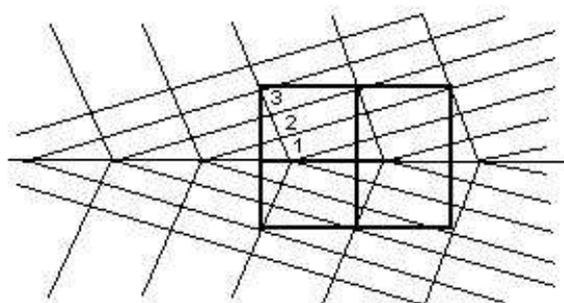


Fig. 10 : Dans ce cas, l'indice de macle vaut 3 : rapport du nombre total de nœuds sur le nombre de nœuds du réseau commun (de la macle)

### 6.1.2. Macles par mériédrie

Les macles par mériédrie que l'on appelle également *Groupe de Complément* et dont l'interprétation est due à Bravais, intervient, comme le nom l'indique, uniquement pour des cristaux mériédres.

Ces cristaux sont moins symétriques que leur réseau ne le leur permet, c'est à dire qu'il existe des éléments de symétrie appartenant au réseau que ces cristaux ne possèdent pas. La macle tend alors à accroître la symétrie, vers l'holoédrie dont découle la mériédrie des deux individus.

Dans ce cas, le réseau secondaire de la macle est confondu avec le réseau des deux individus. L'indice de la macle est ainsi égal à 1, et l'obliquité est nulle.

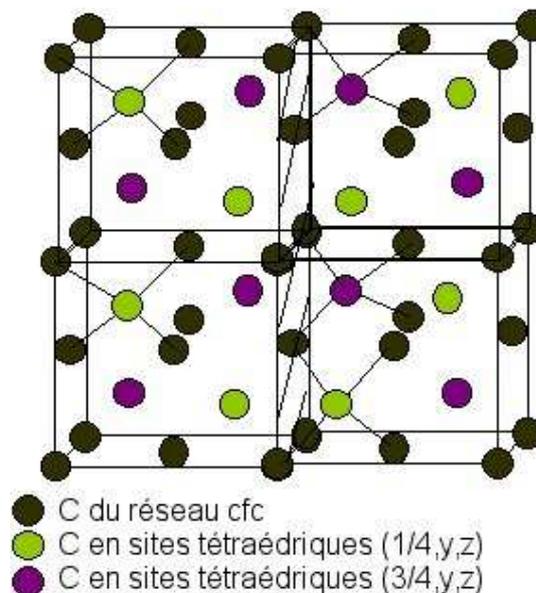


Fig. 11 : Défaut d'empilement dans la structure du diamant  
Le plan hachuré est un plan miroir

En outre, si la mériédrie est d'ordre  $n$ , il existe  $n$  orientations possibles du cristal, symétriques les unes par rapport aux autres, ce qui conduit effectivement à une superposition parfaite du réseau, mais les éléments de symétrie de la macle se trouvent parmi ceux du réseau que l'on n'observe pas sur le cristal.

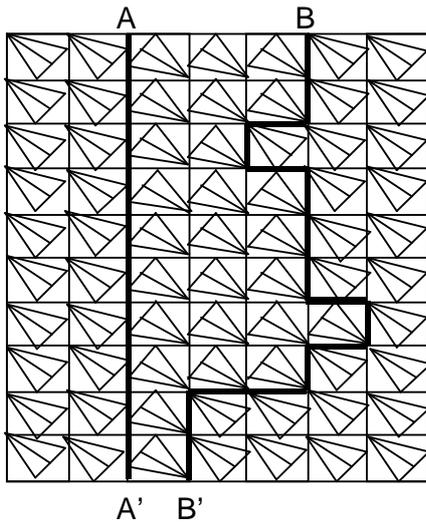


Fig. 12 : Macle par mériédrie

AA' : plan de macle

BB' : surface limite des cristaux quelconques

Ce type de macle par mériédrie peut être difficile à discerner par une simple observation. En effet, si les cristaux possèdent déjà une symétrie holoèdre, la macle demeurera interne au volume du cristal et la macle ne sera pas macroscopiquement décelable. Ainsi, un cube peut receler des macles par mériédrie sans que l'on puisse les détecter.

Les figures 9 et 10 présentent comment peut intervenir les macles par mériédrie non discernables macroscopiquement. Ces macles sont définies par une superposition parfaite entre le réseau des individus et celui de la macle. Ainsi, par exemple, à partir de la structure du diamant (fig. 9), on peut observer un défaut d'empilement de gauche à droite. Si l'on fixe une chronologie de genèse cristalline selon l'axe oy (gauche à droite sur la feuille). On observe un empilement abcdedcba, qui créera une macle selon le plan miroir e, mais qui ne sera pas observable macros-copiquement puisque le réseau cfc est maintenu. Il en est de même sur la figure 10, où l'on a simulé une quelconque géométrie limitée dans la maille élémentaire. Lors de l'empilement des atomes, ions ou molécules, il arrive que tantôt intervienne le motif à pointe en haut à gauche, tantôt celui à pointe en bas à droite (comme pour des carreaux de faïence (1) qui seraient posés dans un sens ou dans l'autre.

La surface d'accolement peut alors être quelconque conduisant à un faciès de pénétration. Elle peut être plane et conduire à une macle par

contact, ou bien même être parfaitement quelconque, et à la limite ne former qu'un mélange isomorphe de plusieurs orientations d'un même cristal comme c'est le cas si l'on considère l'ensemble de la figure 12.

En revanche, s'il s'agit de formes affectées géométriquement par l'holoédrie pentagone, scalénoèdre...), alors il y aura formation de macles par pénétration, et l'on pourra distinguer aisément les deux individus de la macle.

Remarque :

Pour satisfaire aux minimisations des énergies, les macles sont souvent dues à des défauts d'empilement miroirs.

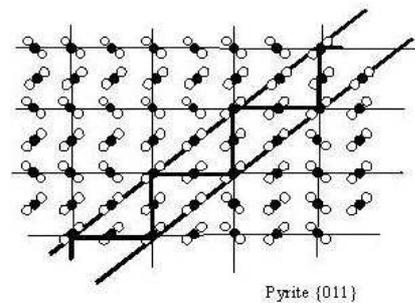
Exemples :

**PYRITE**

La pyrite (1) cristallise dans l'hémièdre centrée du système cubique de symétrie  $\frac{3A_2}{3M} 4 A_3 C$  inférieure à celle de l'holoédrie  $\frac{3A_4}{3M} 4A_3 \frac{6A'_2}{6M'} C$ .

Il y a deux orientations possibles du cristal par rapport au réseau. Les éléments de symétrie qui manquent à la pyrite sont donc  $3A_4, 6 A'_2, 6 M'$ . Pour passer d'un individu à l'autre, on peut adopter indifféremment l'un quelconque de ces éléments géométriques équivalents : rotation de 90° autour de l'un des  $A_4$ , réflexion sur l'un des  $6M'$ ..., sont des opérations identiques pour décrire la fameuse *macle en croix de fer* de la pyrite (fig. 13 – 14a).

Cette dernière est obtenue par inter-pénétration de dodécaèdres (fig. 14), affectés par l'hémiédrie et donc clairement identifiable.



Pyrite {011}

Fig. 13 : structure de la macle croix de fer de la pyrite

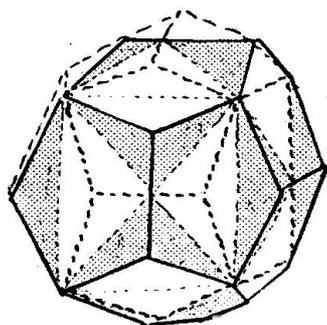


Fig. 14 a) : macle en croix de fer de la pyrite Wyoming Mine Redeliff, Colorado, 12mm

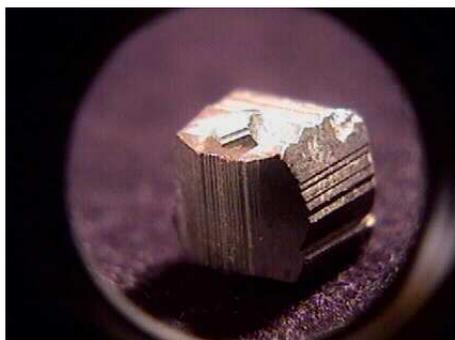


Fig. 14b : Pyrite triglyphe (10mm)



Fig. 14c : octaèdres de pyrite maclés (Pérou)

Dans la variété triglyphe de la pyrite (fig. 14b), les stries visibles sur les faces sont dues à l'alternance des arêtes du dodécaèdre. Elles définissent donc la macle en présentant des domaines où les stries d'une même face sont divergentes, correspondant aux deux orientations rectangulaires possibles.

## QUARTZ

Pour les cristaux tétrartoèdres, il y a quatre orientations possibles du motif cristallin dans le même réseau. Le quartz  $\alpha$  en est un bon exemple. Le recensement des diverses associations conduit à plusieurs types de macles qui, notamment, modifient les propriétés physiques (pouvoir rotatoire et piézo-électricité). On distingue ainsi la macle du Dauphiné, ou macle électrique, celle du Brésil, ou macle électro-optique, et la macle optique.

Les macles dites *par transformation*, sont généralement mieux connues, certainement parce que l'un des meilleurs exemples des minéraux comportant ce type de macle est le quartz. De nombreux minéraux cristallisent sous différentes phases en fonction de la température. Ainsi, si l'une de ces espèces commence à cristalliser dans sa phase haute température, lors du refroidissement interviendra par la suite la cristallisation de la phase basse température. Or, généralement les distances interatomiques sont voisines d'une phase à l'autre. Ainsi, si le degré de symétrie de la phase basse température est inférieure à celle de haute température, comme c'est généralement le cas, elle se maclera en respectant la forme cristalline originelle.

Pour le quartz, cette transition quartz  $\alpha$  – quartz  $\beta$  intervient à 573°C. Le quartz qui cristallise dans sa phase  $\beta$  hexagonale à haute température, cristallise dans sa phase  $\alpha$  rhomboédrique pour des températures inférieures. Il en résulte la formation de macles, généralement de la macle dite « du Dauphiné », plus rarement de celle du Brésil ou encore une combinaison des deux.

C'est ainsi que les cristaux de quartz formés à haute température ; comme ceux des Alpes, présente un faciès basés sur des prismes hexagonaux, alors que leur structure interne, quant à elle, appartient au système rhomboédrique..

Il en est de même pour la leucite, cubique au-dessus de 560 °C, qui devient quadratique en deçà de cette température, pour la wurtzite qui se transforme en blende à 1 024°C, la pyrite qui devient marcassite à 400°C, l'analcime, les grenats...

### Autres exemples :

- Restauration d'un centre de symétrie : wulfénite, topaze, tourmaline, hémimorphite..
- Restauration des axes 4 : pyrite, chalcopryrite, cuivres gris...

### 6.1.3. Macles par mériédrie réticulaire

La macle par mériédrie réticulaire intervient lorsque le degré de symétrie de la macle est supérieur à celle des individus cristallins la constituant, c'est à dire lorsque le réseau de la macle est un multiple du réseau des cristaux isolés.

La figure 15 présente un plan de macle ainsi que la maille élémentaire de la macle. Ici l'indice de macle est 3.

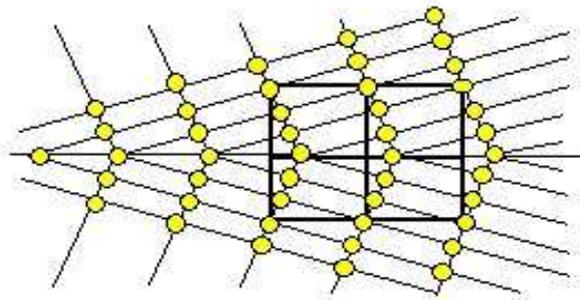


Fig. 15 : macle par mériédrie réticulaire

Les éléments de symétrie définis dans l'édifice tout entier (la macle), et n'appartenant pas aux cristaux indépendants jouent alors le rôle d'éléments de symétrie de la macle.

Ce type de macle ne peut exister (par multiplicité du réseau) que s'il existe une rangée perpendiculaire à l'axe de la macle. Ce qui fait que ce type ne peut exister que pour les systèmes à axe principal ( $A_n^+ > 2$ ) lorsque l'élément de macle est parallèle ou perpendiculaire à cet axe (6).

En pratique, on ne rencontre des macles par mériédrie réticulaire que pour des systèmes possédant une symétrie ternaire (rhomboédrique et

cubique), conduisant à un réseau multiple hexagonal par rotation de  $60^\circ$  autour de cet axe, qui devient alors un axe de rotation d'ordre 6 (fig. 16).

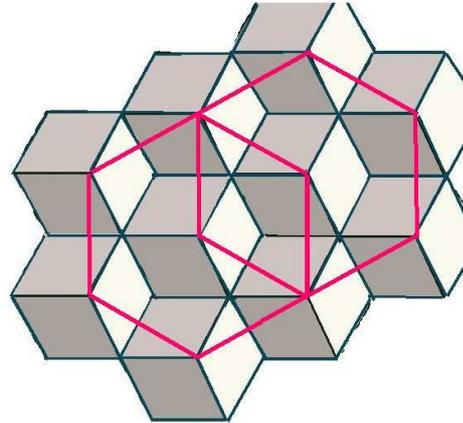


Fig. 16 : Apparition d'une maille multiple hexagonale à partir de mailles élémentaires cubiques.

### Système cubique

#### FLUORINE

Le cas le plus représentatif de ce type de macle par mériédrie réticulaire, est la macle par pénétration de la fluorine (fig. 17-18).

L'axe ternaire du système cubique [111] (grande diagonale du cube) devient axe sénaire (axe d'ordre 6), et il y a formation de la macle par rotation de  $60^\circ$  autour de cet axe.

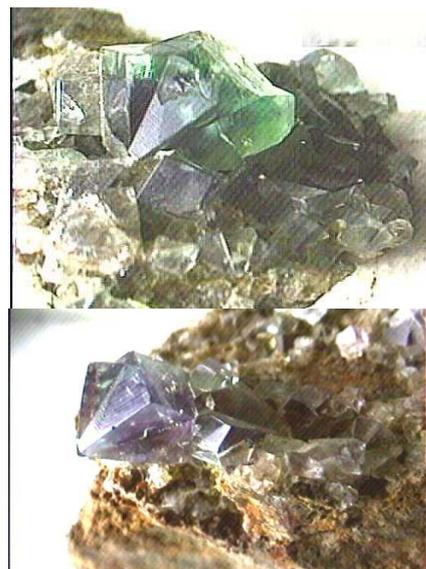


Fig. 17 : Macle (00-1) de la fluorine  
Pour des échantillons du Derbyshire (GB)  
Dim des cristaux environ 1 cm

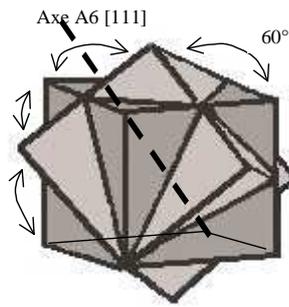


Fig. 18: Macle (00-1) de la fluorine

## SPINELLE

Un autre exemple de macle par mériédrie réticulaire est la macle des spinelles qui associe par contact deux octaèdres selon des plans  $a^1$  (fig. 19).

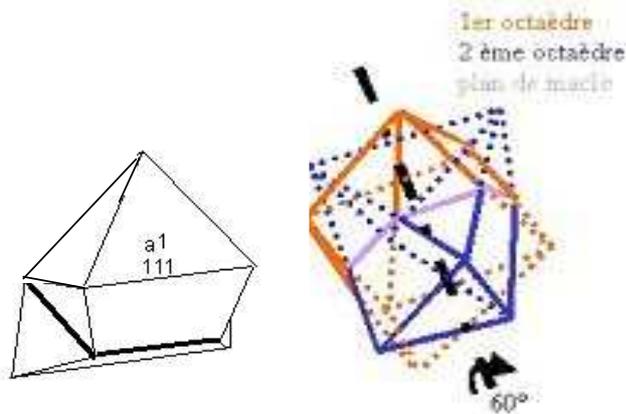


Fig. 19 : Macle des spinelles Mogok. Burma. 46gr.

## Système rhomboédrique

### CALCITE

Dans le système rhomboédrique (fig. 20), la maille simple peut prendre plusieurs orientations à l'intérieur du réseau multiple hexagonal, qui renferme 3 mailles simples rhomboédriques pour 1 maille multiple hexagonale . Il y a alors formation

de macle de manière similaire au maillage par mériédrie, puisque localement, sans changer la structure globale de la macle, il y a apparition de mailles d'orientations différentes.

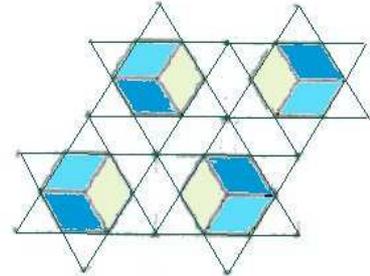


Fig. 20: Macle par mériédrie : 2 positions possibles de la maille rhomboédrique dans la maille multiple hexagonale

Comme exemple de ce type de macle, on peut citer la macle selon (00-1) de la calcite (fig. 21), pour laquelle le plan de jonction est parallèle au plan  $a^1$  du cristal rhomboédrique.

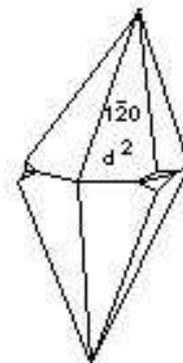


Fig. 21 : Macle par mériédrie réticulaire de la calcite

### Autres Exemples :

diamant, cuivre, argent, or, galène...

Dans de très nombreux cas, la continuité du réseau qui détermine la possibilité d'existence d'une macle n'est qu'approximative.

### 6.1.4. Macles par pseudosymétrie (1)(fig. 22)

Dans ce cas, l'obliquité n'est pas nulle. Elles sont souvent dues à des cristallisations appartenant à des systèmes de plus faibles symétries mais avec

des paramètres proches de sous-multiples de systèmes cristallins de plus hauts degrés de symétrie : ainsi l'exemple de l'albite triclinique pseudo monoclinique, ou de cristaux orthorhombiques pseudo quadratiques.

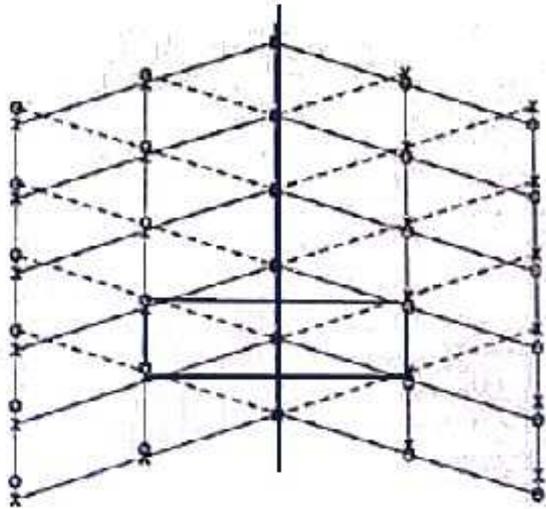


Fig. 22 : Macle par pseudosymétrie

Ces macles apparaissent si le réseau simple ou multiple possède une symétrie approchée qui n'appartient pas au cristal et, plus généralement, s'il existe des plans et rangées suffisamment denses, donc d'indices de Miller simples, qui se trouvent être à peu près perpendiculaires. Tout plan de symétrie admettra une rangée pseudo-perpendiculaire.

Dans le cas d'un plan de macle, l'angle entre la normale au plan et la rangée pseudo perpendiculaire définira l'obliquité de la macle. La mise en évidence d'une macle reviendra donc à rechercher dans le réseau une rangée suffisamment proche de la normale au plan. Le réseau, simple ou multiple, de l'un des individus, se prolonge approximativement dans l'autre, mais les cristaux maclés ont exactement en commun le plan ou l'axe de pseudosymétrie qui sert de plan ou d'axe de la macle. Dans les macles par pseudosymétrie, la surface d'accolement ne peut pas être quelconque ; l'accord entre les deux réseaux ne pouvant se faire que dans le plan d'accolement : macles par contact

## Exemples :

### FELDSPATHS

Tout d'abord, permettez-moi de vous renvoyer au paragraphe 7, qui présente de manière très détaillée les macles des feldspaths.

#### ALBITE

L'albite cristallise dans le système triclinique (le plus pauvre en éléments de symétrie), mais avec des paramètres très proches de ceux du système monoclinique, de sorte que l'on peut observer un maillage pseudo symétrique grâce à ces faibles différences.

Ainsi, le plan (010) est plan de pseudosymétrie et la rangée [010] axe de pseudosymétrie. Cette rangée et ce plan sont pseudo perpendiculaires, et on peut décrire la macle comme s'opérant par rotation binaire autour de [010] aussi bien que par réflexion sur (010). Les deux possibilités sont géométriquement équivalentes, mais seul l'un des deux éléments est rigoureusement commun à deux cristaux.

D'où deux types de macle (fig. 23) :

#### - la macle de l'albite

C'est le plan (010) qui est commun et joue le rôle de plan de macle. L'association s'effectue alors par contact sur ce plan ;

#### - la macle du péricline

C'est la rangée [010] qui est commune et joue le rôle d'axe binaire de macle. L'accolement se fait selon un plan « de section rhombique », qui n'est pas un plan réticulaire mais qui contient notamment la rangée [010].

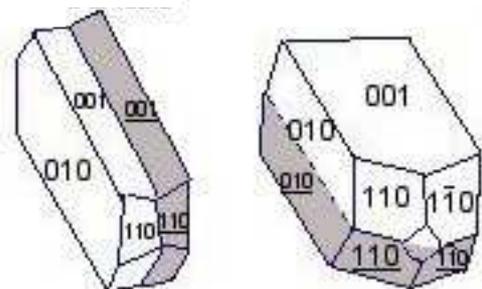


Fig. 23 a) : Macles de l'albite et du péricline



Fig. 24 a) : Macles de carlsbad et du péricline dans orthose (Issoire)



Fig. 24 b) : Macles de l'albite (Queyras)

Cette macle (8 mm) présente de nombreuses caractéristiques des macles : angle rentrant, plus gros que les cristaux voisins

### Autres exemples

Les macles par pseudo symétrie sont les plus abondantes, on les observe par exemple dans les cristaux orthorhombiques pseudo hexagonaux (macle sur {010}) : aragonite, barytine, césurite, marcassite, chrysobéryl, bournonite, etc ; toutes sont de faciès très différents.

#### 6.1.5. Macles par pseudo méridie (fig. 25)

Lorsque la maille élémentaire possède une symétrie approchée supérieure à sa symétrie vraie, on est en présence d'une macle par pseudo méridie.

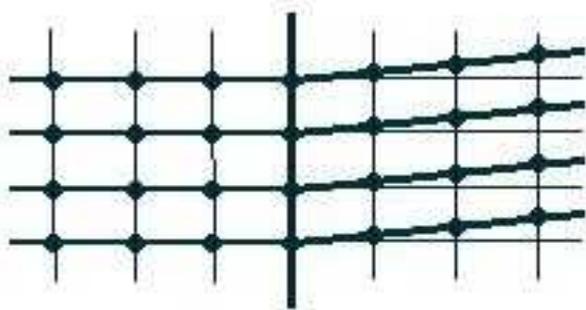


Fig. 25 : Réseaux dans le cas d'une macle par pseudoméridie

Les réseaux tricliniques pseudomonocliniques ou monocliniques pseudoorthorhombiques en sont de bons exemples (2). Le réseau ne se prolonge pas rigoureusement d'un individu à l'autre, et apparaît une certaine obliquité entre les deux individus.

#### 6.1.6. Macles par pseudo méridie réticulaire (fig. 26)

Lorsque c'est la maille multiple qui a une symétrie approchée, les coïncidences de positions atomiques sont encore moins nombreuses, et la macle un peu plus improbable : on l'appelle alors macle par pseudo méridie réticulaire.

Le principe en est schématisé figure 26, avec l'exemple de la macle (001) des pyroxènes monocliniques. Ce sont des particularités de dimensions de la maille élémentaire qui sont responsables de la pseudosymétrie.

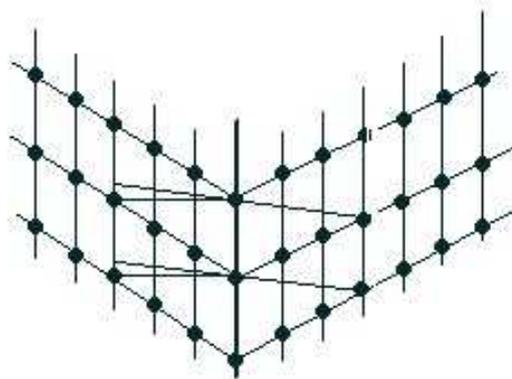


Fig. 26 : Macle par pseudoméridie réticulaire (pyroxènes monocliniques)

### Exemples

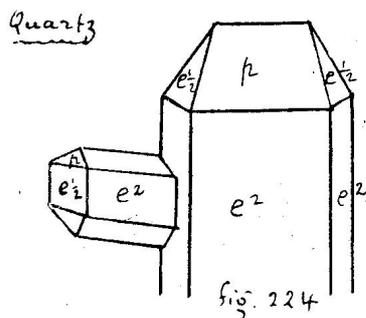
#### CHALCOPYRITE

La maille de la chalcopirite, quadratique, est presque deux fois plus haute que large, et quatre mailles associées pourront donc avoir une symétrie grossièrement cubique. La chalcopirite présente ainsi, en plus des macles du système quadratique, des macles typiques du système cubique.

## QUARTZ

Le quartz, pour ces macles du Japon et de la Gardette (fig. 27) possède également une pseudo-symétrie quadratique d'une maille multiple.

Le plan d'accolement est (11-2) et les individus forment un angle de  $84^{\circ}33'$ , proche mais différent de  $90^{\circ}$ , l'obliquité n'est donc pas nulle.



ates  
n quartz

Fig. 27 a) : Macle de la Gardette pour le quartz



Fig. 27 c) : macle du japon dans un ensemble de cristaux de quartz : macle 7cm , Pérou type de macle F avec net gauchissement des individus



Fig. 27 b) : Macles du japon pour le quartz (Chine)



Fig. 27 d) : Macle de La Gardette : mine de La Gardette Type de macle G



Fig. 27 f) : 3 macles du Japon dans un même ensemble: pièce 7cm , Pérou  
type de macle E et C-D, type de macle B

### Autres exemples

Pour des indices de macle faible (maille multiple pas trop grande), les exemples sont assez nombreux : macle des pyroxènes monocliniques, macle de Carlsbad, macles de la staurolite, du rutile), macle des carbonates orthorhombiques pseudo hexagonaux (cérusite, aragonite)

## 6.2. CLASSIFICATION GENETIQUE DES MACLES

On peut distinguer trois grands groupes de macles en fonction de leur genèse, macle de croissance, macle de transformation polymorphique et macles mécaniques. Mais il est à souligner que si

pour les macles de croissance, la macle est antérieure au développement des cristaux, les macles de transformation et mécaniques sont quant à elles, postérieures à la croissance cristalline et interviennent dans le cristal déjà formé.

### 6.2.1. Macles de croissance

Elles sont dues à la croissance simultanée de deux individus cristallins en géométrie de macle.

### 6.2.2. Macles de transformation polymorphique

La plupart des matériaux possède à haute température une structure à haut degré de symétrie, c'est à dire avec de nombreux éléments de symétrie. Principalement dues à des effets de compacité permis par l'agitation thermique, il s'agit là principalement de structures de type hexagonal ou cubique. A plus basse température, les liaisons interatomiques sont plus fortes car moins soumises à cette agitation thermique, de sorte que les orientations de ces liaisons vont tendre vers des positions d'équilibre (cf fig. 4), dans des structures de moindre degré de symétrie (quadratique, rhomboédrique, monoclinique...).

Ainsi, lorsqu'un minéral passe à l'état solide d'une phase haute température A, à une phase de plus basse température B, il y a ce que l'on appelle *transformation polymorphique*.

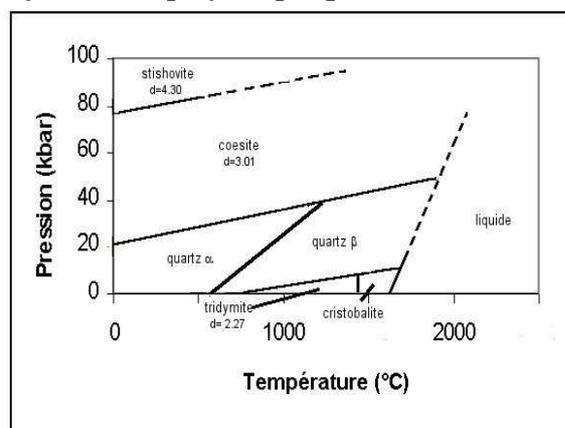


Fig. 28 a) : pseudomorphisme du quartz responsable du maillage  
diagramme température-pression d'existence des différentes phases de la silice

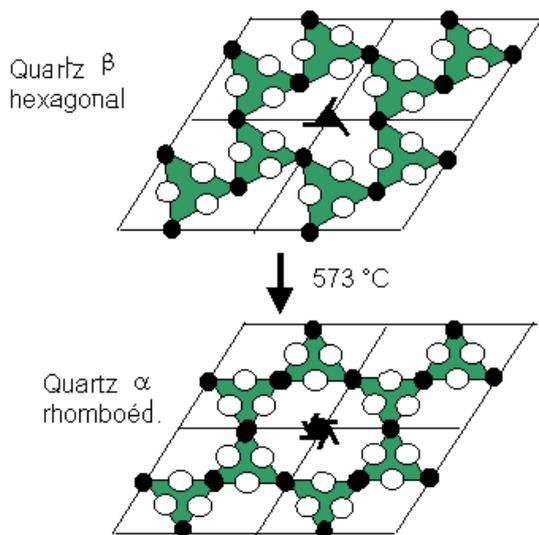


Fig. 28 b) : Polymorphisme : passage du quartz  $\beta$  au quartz  $\alpha$   
 Respect de la structure haute température hexagonale  
 Apparition d'un axe sernaire

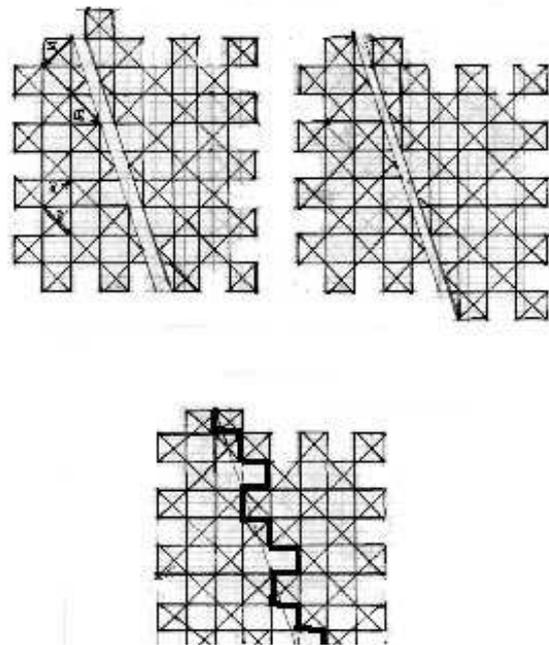


fig. 29 a) : cisaillement selon (210) et recollement d'une structure de type  $\text{ReO}_3$   
 Formation d'une macle mécanique par accolement d'arêtes des octaèdres

### 6.2.3. Macles mécaniques

« Pour certaines espèces minérales, des chocs ou des contraintes anisotropes entraînent une déformation du réseau, laissant une partie de celui-ci en position de macle après relâchement de la sollicitation. La calcite et la blende présentent de nombreuses macles mécaniques visibles sous formes de lamelles de macles également.

Les « plis en genou » observés sur les monocristaux déformés plastiquement de micas, chlorites, pyroxènes, olivines, disthène, molybdénite, stibine et graphite ont les caractéristiques de macles de ce type. »

Je vous ai livré telle quelle la présentation de A. Baronnet (ref. 6), car je ne suis pas vraiment convaincu de sa véracité.

Il convient de revenir à la définition de la macle. La géométrie doit satisfaire à des lois simples et précises. Tout angle défini par une aiguille de stibine ou une lamelle de disthène ne peuvent satisfaire ces lois géométriques.



fig. 29 b): Macle par cisaillement dan de l'orthose (Issoire)

En fait, pour qu'il y ait macle mécanique, les plans réticulaires doivent correspondre (à l'obliquité près) au réseau de l'individu cristallin non soumis à une quelconque sollicitation mécanique.

Pour que cette condition soit satisfaite, il faut que le cristal ait subi un cisaillement. Le plan de cisaillement devient alors le plan de symétrie de la macle (fig. 29).

Comme pour tout cisaillement, le maclage mécanique est facilité par la présence de défauts structuraux, et en particulier de lacunes.

### Nota

Voici ci-dessous (fig. 30) un cristal de quartz qui a subi à mon avis simultanément des contraintes thermique et mécanique. Observez l'aspect mat de la zone centrale, elle est caractéristique de la présence interne de contraintes résiduelles intenses. Dans un tel échantillon, bien que le cisaillement n'est pas été total, il doit être possible de trouver des plans de cisaillement dus à un maclage mécanique. Ce n'est certes pas un cas d'école mais une originalité que je ne résiste pas à l'idée de vous montrer.



fig. 30 : cristal de quartz coudé thermiquement et mécaniquement

## **6.3. CLASSIFICATION MORPHOLOGIQUE DES MACLES**

### **6.3.1. Macles par contact**

Il y a macle par contact s'il n'existe qu'un seul plan de contact entre les deux individus de la macle.

### **6.3.2. Macle par pénétration**

La macle par pénétration est définie par opposition à la macle par contact. Il y a donc plusieurs plans de jonctions entre les deux individus.

Elle ne peut intervenir que pour des macles par mériédrie et par mériédrie réticulaire. Il convient donc de ne pas considérer de simples rapprochements morphologiques, pour des macles par pénétration.

La distinction est d'autant plus difficile que l'on peut être en présence de véritables macles mais que la morphologie de pénétration n'est en fait due qu'à un approvisionnement sélectif vers l'un des deux individus qui croît ainsi plus vite que le second allant jusqu'à l'englober.

Il se peut également que la morphologie de la macle apparaisse comme étant par pénétration lors d'un défaut d'empilement sur un plan autre que le plan de macle. Si le plan de composition est confondu avec le plan de macle, il bissecte des formes équivalentes : les faces en regard auront donc les mêmes propriétés et en particulier la même vitesse de croissance, et la macle se fera par contact. Dans le cas d'un plan de composition différent du plan de macle, les deux cristaux ne sont plus symétriques de part et d'autre du plan de macle, et pourront déborder à travers ce plan qui disparaîtra rapidement. La macle sera alors par pénétration. Si la macle se fait par rapport à un axe, les plans de la zone définie par cet axe peuvent tous, en principe, jouer le rôle de plan de composition.

### **6.3.3. Macles mimétiques**

Il s'agit de macles qui « miment » un édifice de symétrie supérieure.

Il en est ainsi pour le quartz et les autres minéraux qui maclent par transformation polymorphique (cf 5.2.2) (leucite) dont les mailles basse température gardent la morphologie du réseau de la forme haute température du minéral.

Mais de nombreux minéraux « cubiques » présentent cette propriété également : analcime, grenats calciques, boracite, pérovskite, boléite, sénarmonite.

Enfin, il peut y avoir apparition fortuite d'une morphologie hexagonale à partir de cristaux rhomboédriques comme dans le cas de la macle de l'aragonite. Il en est de même pour la barytine, le chrysobéryl...

Si l'obliquité de la macle est faible, cela signifie que la macle est plus facile à obtenir. Ainsi, elle pourra se répéter un plus grand nombre de fois, et elle sera séparée par des lamelles (individus) plus fines.

### 6.3.4. Macles multiples

Les macles multiples sont définies par opposition avec les macles simples, à savoir qu'elles ne sont pas constituées de seulement deux individus, mais d'un plus grand nombre.

Ces individus peuvent être associés de deux manières différentes :

#### - Macles polysynthétiques

Lorsque les plans de composition sont parallèles, le groupe résultant est appelé polysynthétique. Généralement, la juxtaposition des individus s'effectue un grand nombre de fois.

#### Exemples :

**CALCITE** (fig. 31)

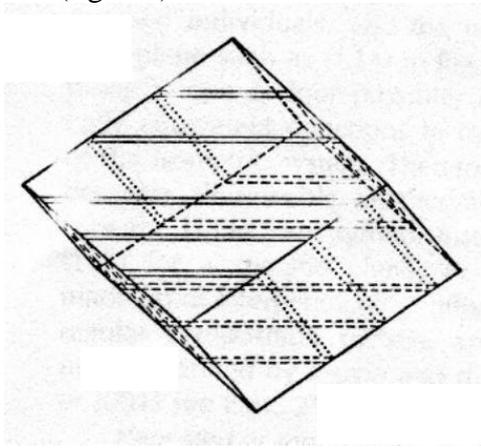


fig. 31 : macle polysynthétique de la calcite sur (-1012) l'une des trois directions négatives du rhomboèdre

### **PLAGIOCLASES**

Les macles polysynthétiques ne sont pas rares dans la série isomorphe qui va de l'albite (fig. 32) à l'anorthite.

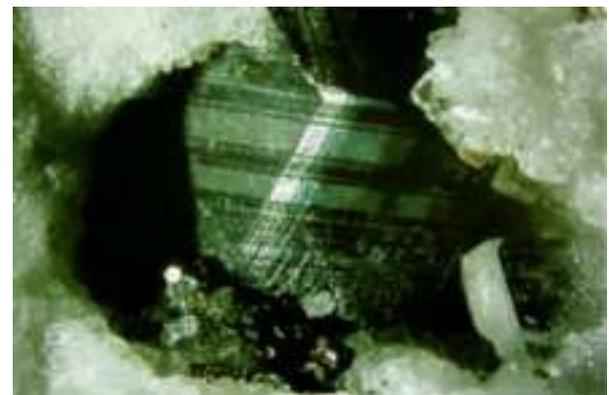
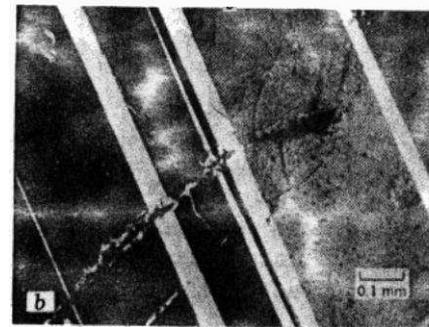
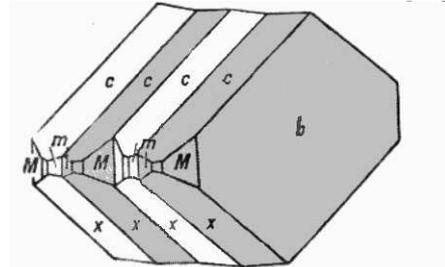


fig. 32 a) : Macle polysynthétique de l'albite selon {010}  
 b) macle observée en microscope polarisant, réflexion perpendiculairement à (010)  
 c) jordanite vallée de binn (Suisse)

**- Macles cycliques**

Lorsque les plans de composition ne sont pas parallèles, le groupe résultant est appelé cyclique, car il peut se refermer éventuellement sur 360°.

**Exemples :**

**CUBANITE**



fig. 33 : Macle cyclique de cubanite (Québec)(2,5x1,5 cm2)

**MARCASSITE**

Les macles de marcassite sont assez fréquentes, et souvent multiples. La multiplicité de macles selon un plan m conduit à la formation d'une structure ressemblant à une crête de coq.

De plus, il arrive que 4 ou 5 individus peuvent former une macle cyclique autour d'un axe central (axe de macle parallèle à c), formant ainsi ce que l'on appelle la macle de la sperkise (fig. 34) ancien nom de la marcassite toujours utilisé dans le Nord (fig. 35).

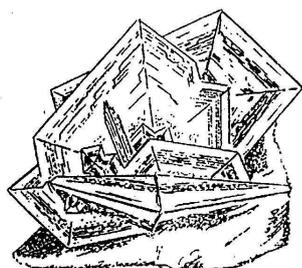


Fig. 35 : sperkise (macle de marcassite du cap Blanc-nez) : logo du magazine du club de Wasquehal

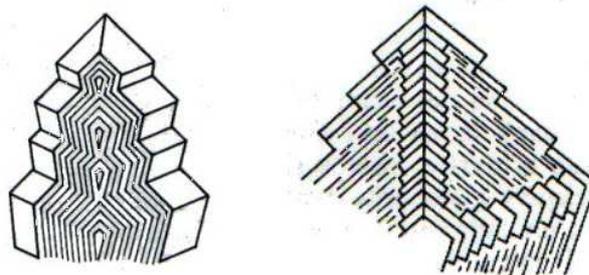


Fig. 34 a): macle en crête de coq (à gauche) et en sperkise (à droite) de la marcassite

b) : sperkise : macle cyclique de la marcassite (cap blanc nez)

**ARAGONITE**

L'aragonite se macle sur les faces {110} par hémitropie par rapport à un plan (fig. 36).

Dans l'aragonite, orthorhombique, l'angle dièdre des faces m, est égal à 116°12', donc voisin de 120°. Par accollement de trois prismes avec m comme plan de jonction, on obtient une macle qui a l'apparence d'un cristal unique de symétrie pseudo hexagonale (fig. 36-37).

Du fait de l'obliquité résultant de la différence entre 116°12' et 120°, la structure de la jonction

conduit au déplacement des atomes proches du plan de jonction (fig. 38).

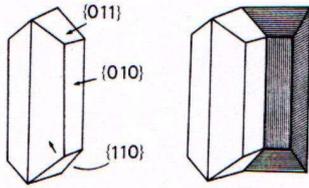


Fig. 36 : Structure de la macle par hémitropie

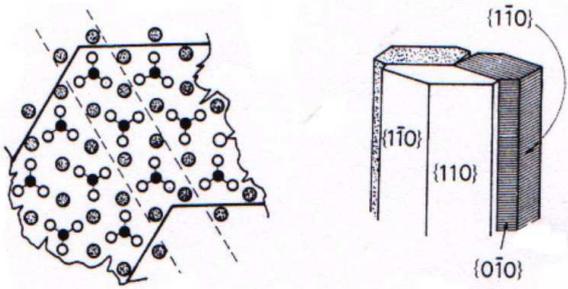


Fig. 37 a) : Macle de l'aragonite formée par un triplet donnant une structure pseudo-hexagonale  
b) aragonite du Portugal (10 mm)

## RUTILE

La macle en genou du rutile (fig. 39) peut donner par multiplicité d'ordre 8, la macle cyclique présentée en fig. 40.

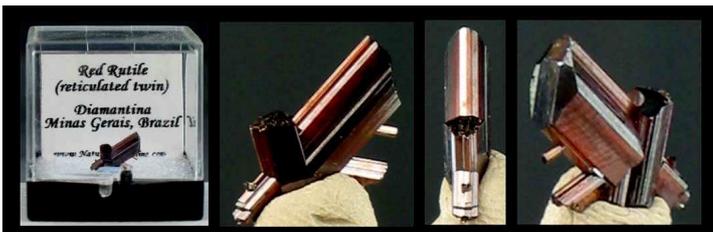


fig. 39 : Macle en genou du rutile  
Minas Gerais (Brésil)

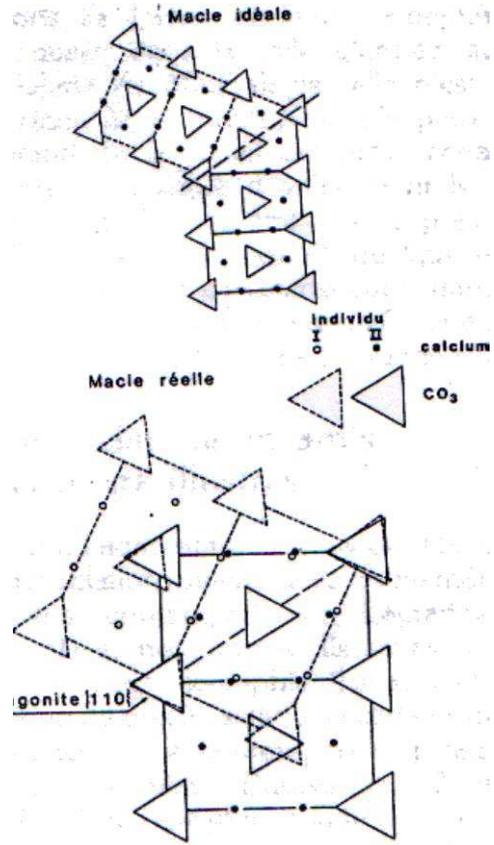


Fig. 38 : Structure de la jonction entre deux individus d'aragonite

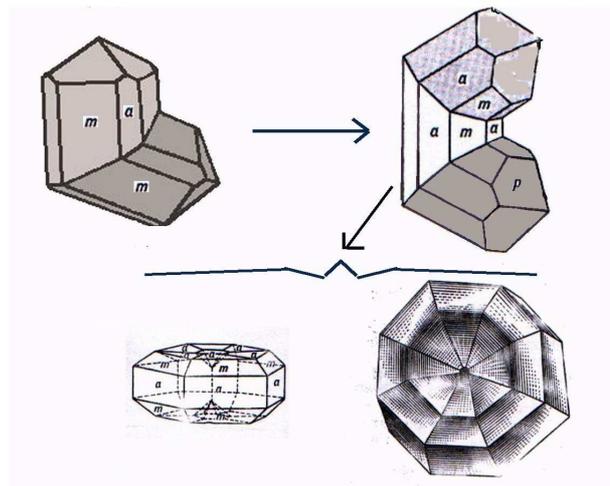
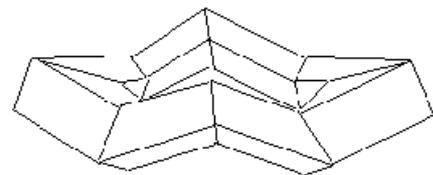


fig. 40 : Macle cyclique d'ordre 8 du rutile



## CASSITERITE

Macles semblable à celle du rutile.



fig. 41: Macle cyclique de cassitérite (Pérou) 10mm



fig 44 b) : Macles de chrysobéryl  
(Valle Aurina- Italie (20 mm)

## CHRYSOBERYL (fig. 42-43)

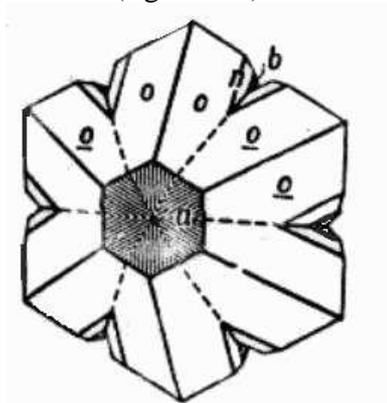


fig. 42 : Macle cyclique du chrysobéryl  
parallèle aux faces {031}



fig. 43 a) : Macle cyclique du chrysobéryl  
parallèle aux faces {031}  
Madagascar 10 mm

## HEMATITE (fig. 45)



fig. 45 : Macle cyclique de l'hématite avec axes principaux  
figurés par le rutile en épitaxie sur l'hématite

## **7. THEORIE DE LA FORMATION DES MACLES**

### **7.1. NOTION DE SYMETRIE LIMITE (8,13)**

Mallard a montré que tous les groupements par pénétration étaient formés, soit par des cristaux hémiedriques qui combinent les deux orientations admissibles, soit par des cristaux à symétrie-limite, c'est-à-dire très voisins, par leurs paramètres, d'un degré de symétrie supérieur à celui de leur système.

Si l'on considère un cristal orthorhombique d'aragonite, l'angle  $\mu\mu$  des faces latérales est de  $116^{\circ}10'$  donc très voisin de  $120^{\circ}$ . On pourra donc, au moyen de ces prismes et en les accolant par trois, obtenir des solides paraissant avoir acquis une symétrie hexagonale, supérieure à celle du système orthorhombique

Il en est de même pour l'orthose ou feldspath monoclinique à base de potasse dans ce qu'on appelle la macle de Carlsbad. Deux cristaux, ayant leurs plans de symétrie parallèles, tournent leurs bases en sens inverse, comme si l'un d'eux, d'abord orienté comme l'autre, avait tourné de  $180$  degrés autour de l'arête prismatique  $\mu\mu$ . Or Mallard a montré que le réseau plan de l'orthose, dans le plan  $g^1$ , est presque rhombique. Ainsi, la combinaison de l'orthodiagonale avec les deux axes quasi-binaires du plan  $g^1$  engendre un assemblage à symétrie-limite rhombique. En tournant autour de l'arête  $\mu\mu$ , qui est l'un des deux axes quasi-binaires, cet assemblage prend une seconde position qui, combinée avec la première, fait naître un édifice plus proche de la symétrie rhombique parfaite.

De la même façon, Mallard a fait voir que la macle de la staurotide résultait de ce que l'assemblage de la substance est pseudo-cubique, de telle sorte que l'axe horizontal, autour duquel a lieu la rotation, est pseudo-quaternaire.

Par une application encore plus complète de la notion de symétrie-limite, M. F. Wallerant est parvenu à donner, non seulement des macles proprement dites, avec faces d'accolement définies, mais de tous les groupements réguliers de cristaux, une théorie qui s'applique à tous les cas enregistrés par l'observation.

Le fait dominant de toute cristallisation est la tendance à la réalisation du plus grand équilibre, tendance qui est pleinement satisfaite quand les particules complexes se disposent sur les nœuds d'un assemblage réticulaire, après avoir orienté leurs éléments de symétrie en conformité de ceux de l'assemblage.

Cette orientation uniforme ne se réalise en grand que dans des circonstances spéciales de calme, de pureté et d'homogénéité durables du milieu cristallogène. Le plus souvent, deux parties voisines de ce milieu ne sont pas dans les conditions voulues pour adopter l'orientation identique qui assurerait le mieux leur équilibre. Mais alors, en vertu du principe de la moindre action, il est naturel que du moins elles s'éloignent aussi peu que possible de cette orientation.

Or s'il existe, pour une particule, un élément de symétrie-limite, c'est-à-dire tel que deux particules complexes, ayant le même centre de gravité, et se disposant symétriquement par rapport à l'élément-limite, aient une partie commune plus grande que pour toute autre position relative, la tendance à l'équilibre déterminera la juxtaposition de deux parties cristallines distinctes. Dans la première, les particules complexes auront l'orientation initiale; dans la seconde, elles auront l'orientation symétrique de la première relativement à l'élément-limite.

De la sorte, la présence de l'élément-limite entraînera forcément, dans le cas de groupements non troublés, la formation simultanée d'un nombre déterminé de cristaux juxtaposés, nombre qu'on peut calculer d'avance, si l'on connaît la symétrie du réseau et celle moindre de la particule. Le nombre de ces groupements, c'est-à-dire des macles, sera d'autant plus grand que la symétrie de la particule sera moins riche en éléments réels, et c'est ainsi que certaines substances n'apparaîtront jamais que sous forme de parties groupées.

Il n'y a donc plus lieu de distinguer d'hémitropies normales ou parallèles, ni d'axes d'hémitropie, ni de groupements par pénétration. Suivant les cas, la macle réalisée mettra en évidence, soit l'axe-limite autour duquel la rotation a eu lieu, soit le plan-limite autour duquel la symétrie s'est accusée.

En poursuivant, à la lumière de cette notion, l'analyse de tous les groupements connus, on arrive à reconnaître que toutes les substances minéralogiques peuvent être considérées comme possédant une symétrie-limite cubique. De cette façon, les axes et les plans mis en évidence par leurs groupements sont ceux qui, si la symétrie était parfaite, joueraient dans le système cubique le rôle d'éléments réels.

Cette notion, de la presque identité cristallographique de toutes les substances, notion déjà établie par Mallard, cadre bien avec ce qu'enseigne l'étude des propriétés physiques des corps suivant les directions, car l'expérience montre que les ellipsoïdes représentatifs de la disposition de ces propriétés diffèrent très peu de sphères.

## **7.2. NOTION DE HASARD**

Henri-Jean SCHUBNEL (1) s'oppose vigoureusement à cette théorie qui prétend que les macles ne tendent pas à représenter la matière à la recherche de la symétrie maximale.

Pour ma part, je suis d'accord avec lui. Et ce pour deux raisons. Premièrement, cela n'explique pas l'existence de macle en V (quartz de la Gardette). Et deuxièmement, puisque les macles existent, si elles représentaient l'état de plus haut niveau de symétrie, il est probable qu'énergétiquement, leur structure du réseau correspondrait à une énergie minimale.

Or, il n'en est rien, puisqu'il est nécessaire d'avoir des défauts et principalement des impuretés pour permettre l'apparition d'un plan ou d'un axe sur lequel la croissance cristalline intervienne d'une manière non « conventionnelle » et permette ainsi la formation de la macle.

*Si la macle est autorisée par les lois cristallines, il est nécessaire qu'il y ait des défauts, qui surviennent de manière hasardeuse, pour qu'il y ait maclage.*

En conclusion, définir qu'une pénétration de deux cristaux est bien une macle est très difficile, et nécessite beaucoup d'expérience. En conséquence, cette étude n'est pas terminée.

## 8. PRINCIPALES MACLES

### 8.1. Système triclinique

- Sur plan basal (010), (001) ou (100), souvent combinés, donnant une macle à symétrie pseudo-orthorhombique leightonite, polyhalite, synadelphite, disthène, wollastonite...

- Plusieurs autres lois, toutes des cas particuliers, notamment la macle en X du disthène sur (.308), (110) dans l'aenigmatite (amphibole triclinique), (104)(0.12) (12.1) dans l'hémihedrite.

NOM	SYSTEME	TYPE DE MACLE
DISTHENE	Triclinique holoèdre -1	- Sur plan basal {100} - Macle en X sur {308}
FELDSPATHS (9) (Tab.1)		<p>De nombreuses sortes de pseudo-symétries peuvent apparaître dans la structure des feldspaths. Il en résulte un nombre important de types de macles selon diverses symétries. Le tableau 1 présente les principales géométries de formation de ces macles.</p> <p>Ce tableau est décomposé en trois parties : les macles perpendiculaires, parallèles et composées.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Les macles perpendiculaires ont leur axe de macle perpendiculaire à l'une des faces du cristal, et elle-même est parallèle au plan de composition. Dans le cas, d'un cristal possédant un centre de symétrie, ce maillage conduit à une symétrie miroir, selon le plan de composition.</li> <li>- Les macles parallèles ont pour axe de macle, l'une des arêtes du cristal. Le plan de composition est parallèle à l'axe de macle.</li> <li>- Parfois, il arrive que trois cristaux soient dépendant les uns des autres. Par exemple, s'il y a un maillage perpendiculaire entre les cristaux A et B, et un maillage parallèle entre B et C, , A et C sont alors reliés par un maillage composé.</li> </ul> <p>Les macles de Carlsbad, Baveno et de Manebach, peuvent être observée aussi bien chez les feldspaths monocliniques (orthose), que chez les feldspath tricliniques (albite, microcline, anorthose, anorthite, labradorite, andésine), et principalement lors d'association simple, ne comportant que deux individus, bien que des associations de 3 ou 4 individus ont été reportées.</p> <p>Les macles de l'albite sont très fréquemment rencontrés chez les feldspaths alcalins tricliniques (albite, microcline, anorthose) ainsi que la macle du péricline dans</p>

<p>FELDSPATHS POTASSIQUES</p>	<p>Triclinique holoèdre -1</p>	<p>une moindre fréquence. La structure des feldspaths tricliniques ne dévie pas beaucoup de la symétrie monoclinique ; (010) est un plan pseudo miroir et y est un pseudo axe « diad », Dans la macle de l'albite, le plan de contact entre les deux individus (010), est un vrai plan miroir comme pour la structure triclinique, pour chaque côté.</p>
<p>MICROCLINE AMAZONITE</p>	<p>Triclinique holoèdre -1</p>	<p>La macle du microcline est caractérisée par une combinaison entre les macles de l'albite et du péricline (différente de la macle composée de l'albite). Beaucoup de microclines sont micro-perthitiques et gardent la structure monoclinique qu'ils ont lorsqu'ils sont isolés. La relation singulière qui existe dans le microcline entre les deux types de maillage peut être mis en évidence car le microcline cristallise originellement dans le système monoclinique. Des zones du cristal deviennent tricliniques lorsque l'axe y est parallèle à l'axe b du système monoclinique ; les macles sont alors du type péricline. D'autres zones deviennent tricliniques car le plan (010) est parallèle au plan (010) du réseau monoclinique ; la macle est alors de type albite.</p>
<p>FELDSPATHS PLAGIOCLASES</p>	<p>Triclinique holoèdre -1</p>	<p>Pour les feldspath plagioclases, les macles sont les mêmes que pour les feldspaths alcalins, mais il existe généralement une petite différence due à la légère obliquité de la maille des plagioclases. De plus, ils forment souvent de petites macles multiples à l'échelle microscopique. Les macles les plus fréquentes des feldspaths alcalins sont les macles de l'albite, du péricline, puis dans une plus grande rareté, celle de l'acline, de l'Estérel ou Ala, et le maillage est souvent multiple. On rencontre également des macles composées de macles de l'albite et du Péricline.</p>
<p>ANORTHITE</p>	<p>Triclinique holoèdre -1</p>	<p>Les combinaisons observées chez la microcline sont également fréquentes pour l'anorthoclase. Toutefois, les sections rhombiques sont très différentes (-2 à -5 ° contre -83° pour la microcline.</p>
<p>ANDESINE MICROCLINE LABRADORITE</p>	<p>Triclinique holoèdre -1</p>	<p>Les combinaisons observées chez la microcline sont également fréquentes pour l'anorthoclase. Toutefois, les sections rhombiques sont très différentes (-2 à -5 ° contre -83° pour la microcline.</p>



Macle de l'albite (Queyras) 8 mm



amazonite : macle de Manebach (Colorado)



albite : macle de Baveno

Wollastonite	Triclinique holoèdre -1	Sur {100}
--------------	----------------------------	-----------

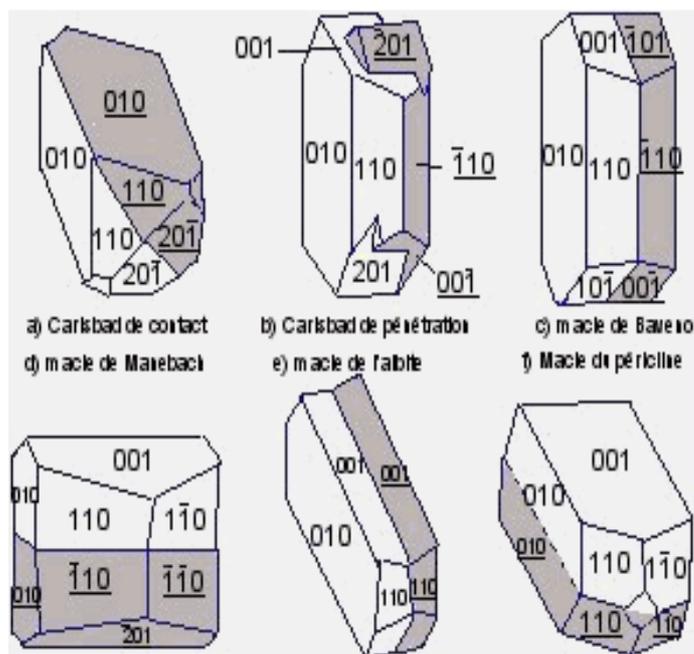


fig. 41 : Principales macles des feldspaths

Nom	Axe de la macle	Plan réticulaire	Remarques
<b>Macles perpendiculaires</b>			
Albite	$\perp (010)$	(010)	Répétée ; seulement triclinaire
Manebach	$\perp (001)$	(001)	Simple
Baveno (droite)	$\perp (021)$	(021)	} Simple , rare pour les plagioclases
Baveno (gauche)	$\perp (0-21)$	(0-21)	
X	$\perp (100)$	(100)	
Prisme (droit)	$\perp (110)$	(110)	
Prisme (gauche)	$\perp (1-10)$	(1-10)	
<b>Macles parallèles</b>			
Carlsbad	[001]	(hk0), souvent (010)	} simple
Péricline	[010]	(h0l), section rhombique, parall à y	
Acline A	[010]	(001)	} répétée ;
Acline B	[010]	(100)	
Estérel	[100]	(0kl), section rhombique, parall à x	
Ala A	[100]	(001)	} répétée ;
Ala B	[100]	(010)	
<b>Macles composées</b>			
Albite-Carlsbad (Roc tourné)	$\perp z$	(010)	} répétée ;
Albita-Ala B	$\perp x$	(010)	
Manebach-Acline A (scopie)	$\perp y$	(001)	
Manebach-Ala A	$\perp x$	(001)	
X-Carlsbad	$\perp z$	(100)	
X-Acline B	$\perp y$	(100)	

Tab 1 : Macles des feldspaths

- Les macles parallèles ont pour axe de macle, l'une des arêtes du cristal. Le plan de composition est parallèle à l'axe de macle.
- Parfois, il arrive que trois cristaux soient dépendant les uns des autres. Par exemple, s'il y a un maillage perpendiculaire entre les cristaux A et B, et un maillage parallèle entre B et C, A et C sont alors reliés par un maillage composé.

Les macles de Carlsbad, Baveno et de Manebach, peuvent être observée aussi bien chez les feldspaths monocliniques (orthose), que chez les feldspath tricliniques (albite, microcline, anorthose, anorthite, labradorite, andésine), et principalement lors d'association simple, ne comportant que deux individus, bien que des associations de 3 ou 4 individus ont été reportées.

Les macles de l'albite sont très fréquemment rencontrés chez les feldspaths alcalins tricliniques (albite, microcline, anorthose) ainsi que la macle du péricline dans une moindre fréquence.

La structure des feldspaths tricliniques ne dévie pas beaucoup de la symétrie monoclinique ; (010) est un plan pseudo miroir et y est un pseudo axe « diad »,

Dans la macle de l'albite, le plan de contact entre les deux individus (010), est un vrai plan miroir comme pour la structure triclinique, pour chaque côté.

## 8.2. Système monoclinique

C'est le système cristallin le plus abondant, et les macles y sont légion.

### **Macles par rapport à un axe**

Elles sont diverses et nombreuses. Les plus connues sont celles des feldspaths : macle de Baveno par rotation autour de [021] ou de Carlsbad, autour de [001], sans oublier les six macles par rotation de la staurolite, ou quatre des macles de la cryolite (pseudocubique).

### **Macles par rapport à un plan**

Sur plan basal : (100) très courant, donnant un édifice à symétrie pseudoorthorhombique : clinopyroxènes, clinoamphiboles, gypse, arsénopyrite, wolframite, sphène, whewellite, herderite, lazulite, malachite, monazite.

Parfois (001) dans les clinopyroxènes, la herderite, les clinohumites, rarement -(010), la macle «de Montmartre», dans le gypse.

Sur d'autres plans : pas de loi prédominante mais plusieurs macles,

(101) clinopyroxènes, phillipsite-harmotome, calaverite,

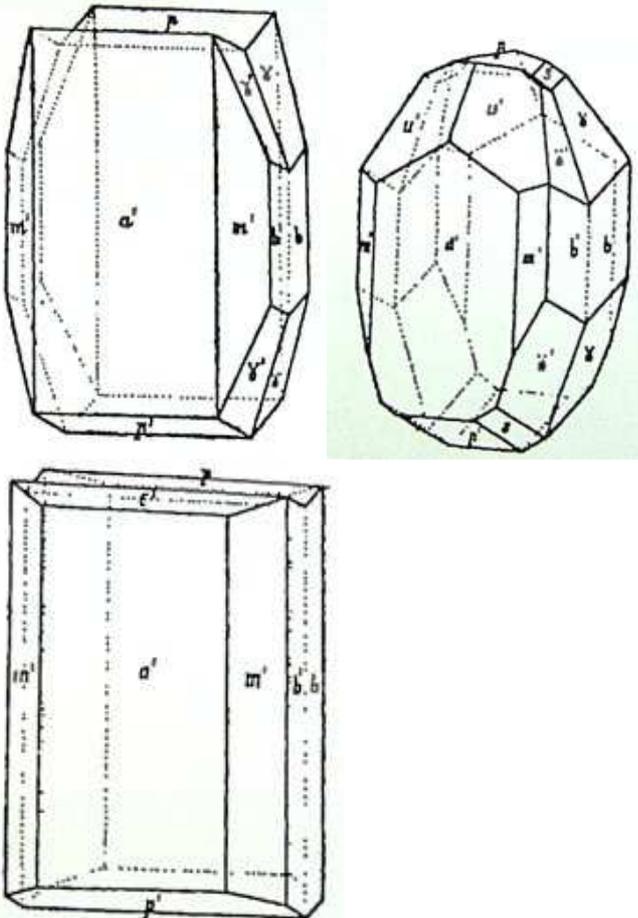
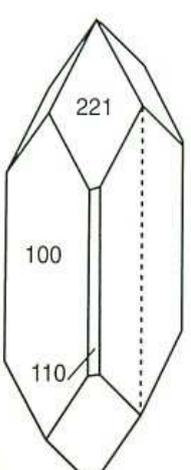
(110) micas,

(011) clinopyroxènes, manganite, micas,

(320) énergite,

et de nombreuses autres lois, particulières aux coïncidences de paramètres dans chaque espèce, restaurant une symétrie orthorhombique (parabutlerite (.105), azurite (.102), quadratique (monazite), rhomboédrique (kammererite), hexagonale (mimétite) ou cubique (cryolite).

NOM	SYSTEME	TYPE DE MACLE
Acmite	Monoclinique holoèdre 2/m	Commune sur {100}
Aegyrine	Monoclinique holoèdre 2/m	Commune sur {100}
Arsénopyrite	Monoclinique holoèdre 2/m	Fréquentes par accolement ou interpénétration entre autres selon {101} Il existe également des macles en croix ou en étoiles
Augite	Monoclinique holoèdre 2/m	Sur {100}, 

Chloritoïde	Monoclinique holoèdre 2/m	Cristaux tabulaires souvent maclés
Cryolite	Monoclinique 2/m	Par interpénétration communes selon une dizaine de lois de macle
Diopside hedenbergite	Monoclinique holoèdre 2/m	<p>Sur {100}, souvent polygénétique ; sur {001} rare</p>  <p>Diopsides maclées du lac Baïkal d'après Kokscharow (1862), in Goldschmidt</p>  <p>Diopside maclée de Madagascar selon (100), d'après Lacroix (1922)</p>





Orthose présentant la macle de Baveno



Macle multiple de sanidine (Massif du Sancy)



Orthose présentant la macle de Manebach



Macle Péricline+Carlsbad (vue de dessus) (Issoire)



Macle de Sanidine Puy de Sancy 4 cm



Macle de Carlsbad sur de l'orthose (Issoire)

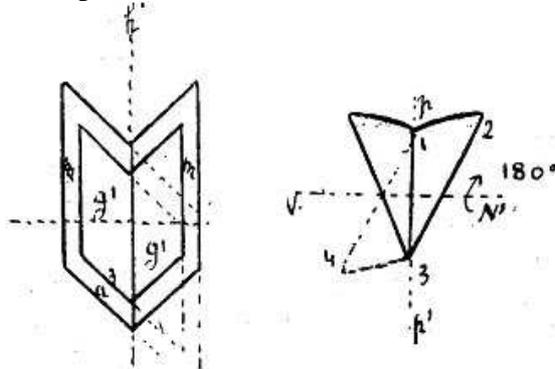
Gypse

Monoclinique  
holoèdre 2/m

Par accolements ou par pénétration fréquentes selon {100}  
(macles dites en queue d'aronde) ainsi que selon {-101}

Le gypse forme à partir de cristaux aplatis  $mg^1 a^2$ , deux macles :

- La macle en fer de lance  
Après section par un plan pp passant par deux sommets opposés puis hémitropie. Les faces de cette macle sont généralement courbes.
- La macle en queue d'hirondelle  
Le plan de section est parallèle à un plan  $h^1$  et l'hémitropie, effectuée autour d'un axe perpendiculaire à ce plan.



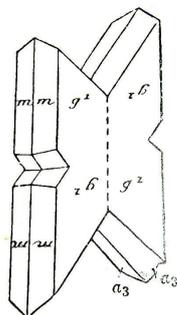
Macles du gypse

- a) macle de la queue d'hirondelle
- b) Macle en fer de lance



- a) Gypse fer de lance de Vitry sur Orne (57) 6 cm
- b) pièce origine inconnue 8 cm

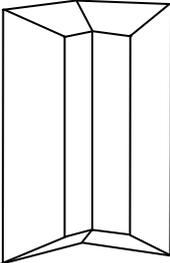
La macle en queue d'hirondelle est souvent multiple et conduit alors parfois aux surprenants faciès de la sélénite.

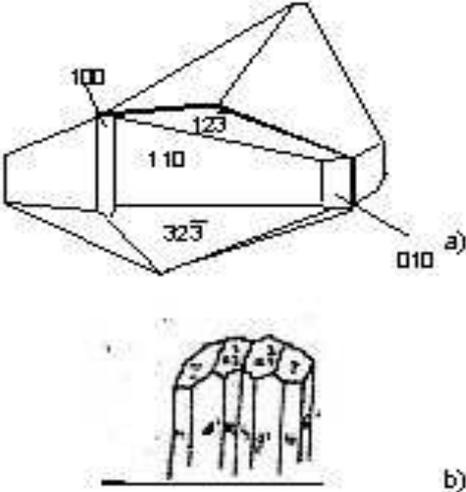


Gypse queue d'hirondelle de Sinard (05)  
a) 8 cm b) 3 cm



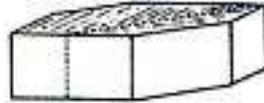
sélénite : Mexique : 12 cm

Hornblende	Monoclinique holoèdre 2/m	Macle sur {100} de deux individus présentant la combinaison du pinacoïde {010} et des prismes verticaux {110} et horizontal {011} 
Laumontite	Monoclinique holoèdre 2/m	sur {100}
Lavénite	Monoclinique holoèdre	Fréquente sur {100}

<p>Malachite</p>	<p>monoclinique 2/m</p>	<p>Selon le pinacoïde {100} fréquentes</p> <p>La malachite, bien qu'elle appartienne au système monoclinique, possède un angle <math>ph^1</math> voisin de <math>90^\circ</math>. Elle est donc pseudo orthorhombique.</p> <p>La macle se forme alors avec <math>h^1</math> comme plan de macle et plan de jonction, et la perpendiculaire à <math>h^1</math> comme axe de macle</p>  <p>macle de la malachite selon <math>h^1</math></p>
<p>Manganite</p>	<p>Monoclinique 2/m</p>	<p>Sur {011} fréquentes</p>
<p>MICAS</p> <p>Muscovite</p>		<p>Sur plan basal {001}</p> <p>Sur plan {110}</p> <p>Multiple étoilée</p> <p>La muscovite présentée ci-dessous est un fabuleux exemple de macle pour un mica.</p> <p>La structure du mica, hexagonale, est ici décomposée en deux parallélogrammes dont l'orientation est différente; comme présenté pour la calcite dans le paragraphe relatif aux macles par mériédrie réticulaire.</p> <p>Dans ce cas très particulier, les feuillets de la muscovite ont perdu une partie de sa géométrie (axe sernaire (ordre 6) alors que la macle, elle, l'a gardé.</p>



Mica  
{001}



{110}



Macle multiple  
"Mica étoilé"



Macle de muscovite (Chine) (8x5 cm<sup>2</sup>)



Macle sur {110} avec apatite,  
Panasqueira, Portugal (2 cm)



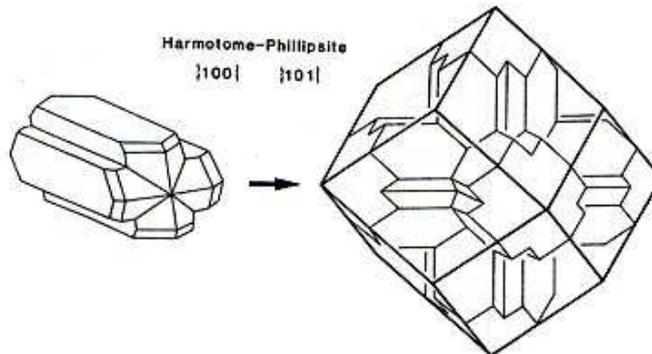
Mica étoilé  
Taquaras, Minas Gerais (3 cm)

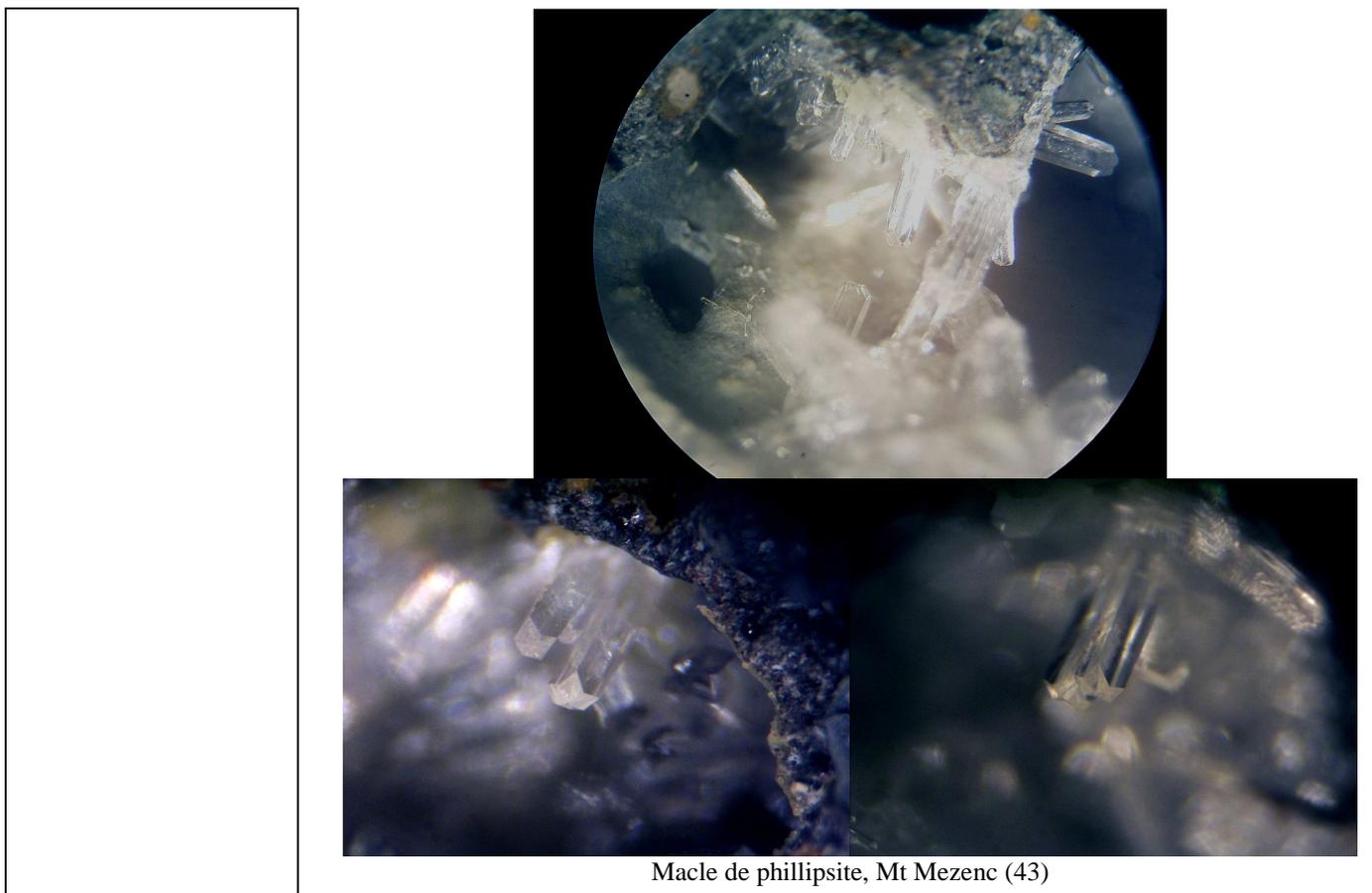
Phillipsite

Monoclinique

Sur {101}

Groupe de macles simulant une symétrie cubique : les 3 quadruplets sont perpendiculaires les uns les autres, comme les axes de symétrie d'ordre 4 d'un dodécaèdre rhomboïdal, chaque quadruplet comporte deux macles par interpénétration (donc quatre individus cristallins)

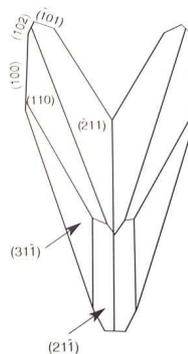




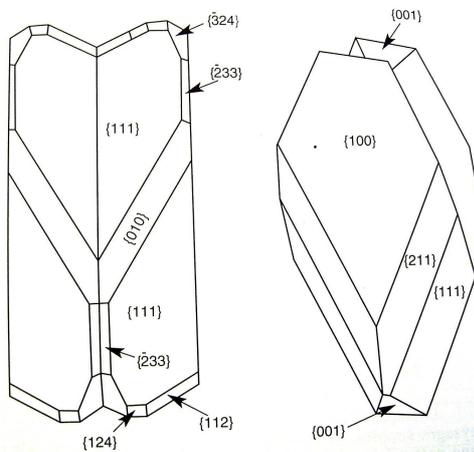
Macle de phillipsite, Mt Mezenc (43)

Phosphophyllite

Monoclinique holoèdre  
2/m

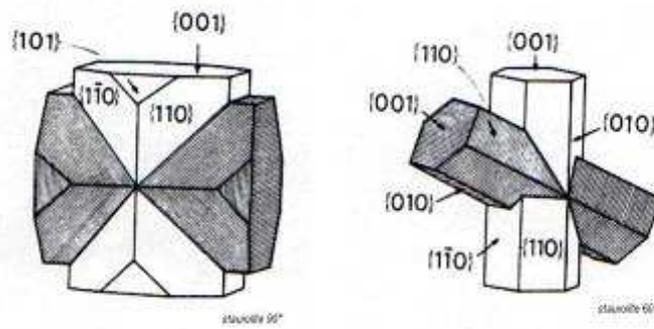


Macle en V de phosphophyllite d'Hagendorf (in Kasming 1994)



Macle tabulaire et en V de phosphophyllite du Cerro Rico (in Wilson et Petrov 1999)

		 <p>Ht 1,8 cm Cerro de Potosi, Bolivie, coll C.Davis, photo J. Scovil Ht 38 cm Llalagua, Bolivie, coll ENSMines Paris, photo J. Scovil</p>
<p>PYROXENES</p> <p>Dioside Hédenbergite Spodumène Enstatite</p>	 <p>Pyroxènes {010}</p> <p>vue de dessus</p> <p>vue de côté</p> <p>{101}</p>	<p>Spodumène Monoclinique holoèdre 2/m Commune sur {100}</p>
<p>Staurotide</p>	<p>Monoclinique holoèdre 2/m</p>	<p>La staurolite forme deux macles par pénétration très typiques. En forme de croix, les cristaux sont inclinés l'un par rapport à l'autre de 90° ou de 60° (fig. 66-67)</p> <p>La staurolite qui cristallise dans le groupe mmm forme donc :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- une macle avec un angle proche de 90° lorsque le plan de macle est {032}</li> <li>- une macle avec un angle proche de 90° lorsque le plan de macle est {232}</li> </ul> <p>Macles cruciformes selon {031} croisette de Bretagne ou {231} croix de St André</p>



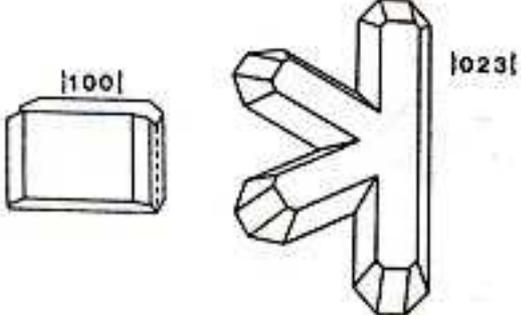
et une macle qui associe 60 et 90°

Titanite ou sphène

Monoclinique holoèdre  
2/m

Accolements ou pénétrations selon {100}



Trémolite Actinote	Monoclinique holoèdre 2/m	Possible sur {100}
Wolframite	Monoclinique holoèdre 2/m	

### 8.3. Système rhomboédrique

#### Macles par rapport à un axe

Rotation de 60° par rapport à l'axe ternaire : quasi universelle : carbonates rhomboédriques, hématite, quartz (macle du Dauphiné), chabazite, phénacite, cinabre, argents rouges ...

#### Macles par rapport à un plan

Sur plan basal-ou encore sur plan prismatique : (11.20) même macle que la rotation susnommée : ankérite, dolomie, pyrargyrite...

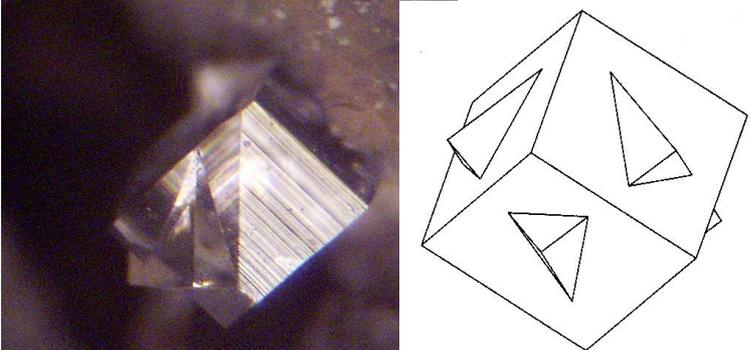
Sur plan pyramidal (10.11) calcite, dolomie, hématite, corindon, paratacamite, argents rouges, quartz (macle de l'Esterel) ;

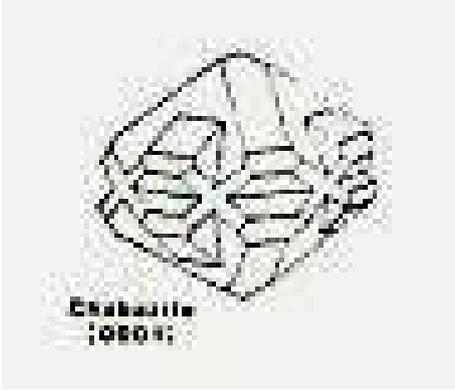
(10.14) antimoine, arsenic, proustite, pyramyrite ;

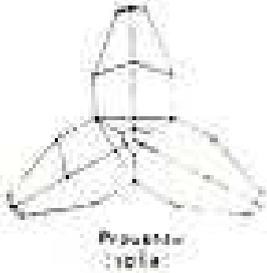
(01-10) calcite, proustite, pyrargyrite, quartz (macle du Brésil)

(02.21) calcite, dolomie

(11.22) quartz (macle de la Gardette ou du Japon) et quelques autres encore.

NOM	SYSTEME	TYPE DE MACLE
Ankérite	Hémiédrie centrée -3	
Calcite	Rhomboédrique holoèdre -32/m	Courantes sur le rhomboèdre négatif {01-12} ou le pinacoïde {0001} voir texte pour toutes les macles
Chabazite	Rhomboédrique holoèdre -32/m	Interpénétration sur {0001} 

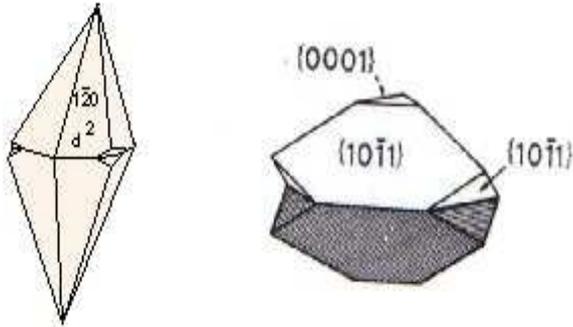
		 <p>Crabapple 1980</p>
Cinabre	Hémiédrie henantiomorphe 32	<p>Macle par interpénétration selon {0001} fréquente</p>  <p>cinabre, Tongren, Chine 10 mm</p>  <p>Duyun, Guizhou Province, China</p>
Corindon	Rhomboédrique 32/m	<p>– Fréquentes {10-11} et {0001} En lamelles triangulaires avec les pointes orientées vers le haut et vers le bas</p>

		 <p>rubis maclé perp. à [001] recto - verso</p>
Hématite	Rhombhoédrique -3 2/m	Selon {10-11} et {0001}
Ilménite	Rhombhoédrique -3	Sur {10-11} et {0001}
Proustite	Rhombhoédrique 3m	{10-14} ou {10-11}
		 <p>Proustite trigonal</p>
Pyrargyrite	Rhombhoédrique 3m	De croissance fréquente selon {10-14} ou {10-11}
Quartz		<ul style="list-style-type: none"> <li>- macle de la gardette ou du Japon {11-2}</li> <li>- macle de Zwickau , angle de 42°17'</li> <li>- macle de Goldschmidt, angle de 47°43'</li> <li>- macle de Breithaupt, angle de 48°54', par contact selon le plan {11-1}</li> <li>- macle de Friedel, angle de 90°, selon le plan {44-1} avec rotation de 45°39'</li> <li>- macle de Reichensten-Grieserenthal, angle de 76°26', selon le plan {10-1} avec rotation de 180°</li> <li>- macle de Sella, angle de 64°50' selon le plan {10-2}</li> </ul>

## CALCITE

Il existe pour le moins 6 sortes de macles dans la calcite dont :

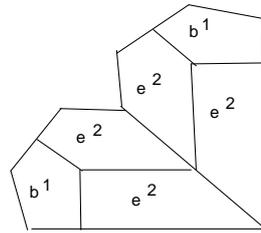
- Macle  $a^1$  : les cristaux se placent symétriquement de part et d'autre d'un plan horizontal (de notation  $a^1$ ). Le scalénoèdre  $d^2$  montre assez souvent cette association .



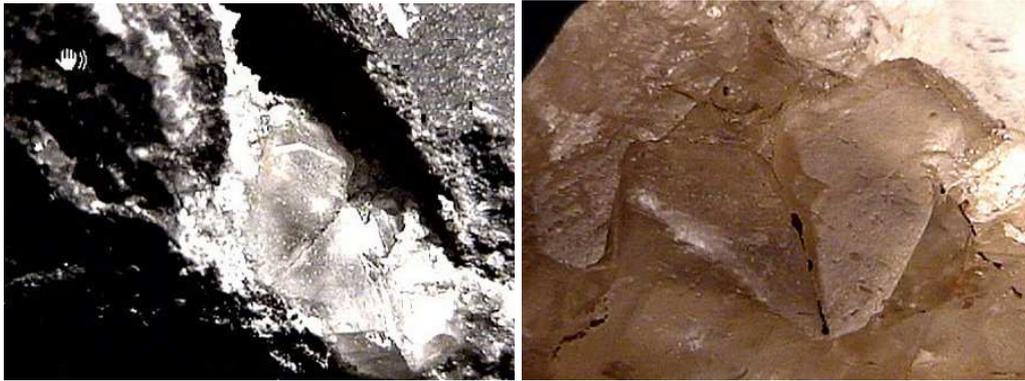
macle  $a^1$  de la calcite sur  $\{0001\}$

- a) Gargeon (59) 8 cm
- b) Mons sur marchienne 6 cm
- c) Poona (30 mm) Inde

- Macle p ou macle en cœur : suivant une face de clivage p qui devient commune à 2 cristaux. Les axes des deux parties font un angle de  $89^{\circ} 13'$



macle p de la calcite



(Avesnes sur Helpe 20mm et 40 mm)



a) Macle de calcite (Egremont, Cumberland, Angleterre (18 mm) b) ?  
Macle en papillon (association de 2 scalénoèdres)

- Macle de Derbyshire selon {10-11}

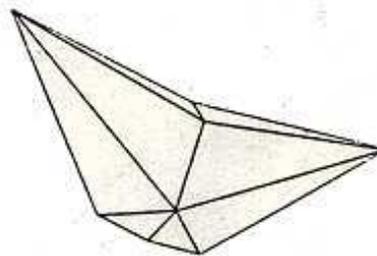


Macle de calcite (Egremont, Cumberland, Angleterre (25 mm)

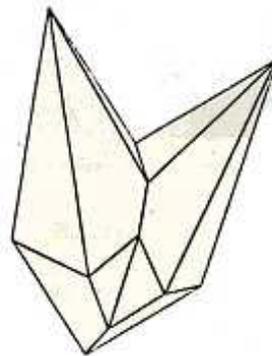


Macle de calcite Mexique 3 cm

- Macle en papillon sur (0.1.12) et sur (022.1)



Macle sur (0112)



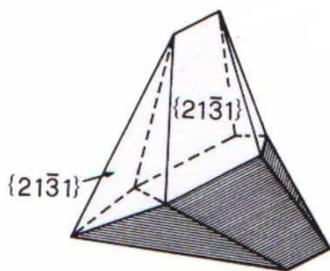
Macle sur (0221)

autres macles de la calcite

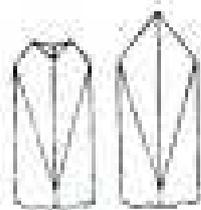


autres macles de la calcite 15 mm et 25 mm (Belgique)  
Macle sur (022-1)

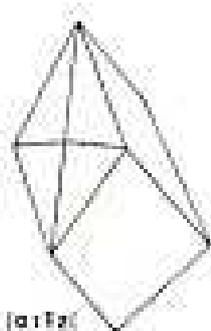
- Autres macles



Macle en papillon sur {1.102}



(02.21)



(01.12)



(10.11)



Mons sur marchienne 10 cm macle en mitre d'évêque, Noter le plan de macle verticale et la parfaite symétrie des deux individus

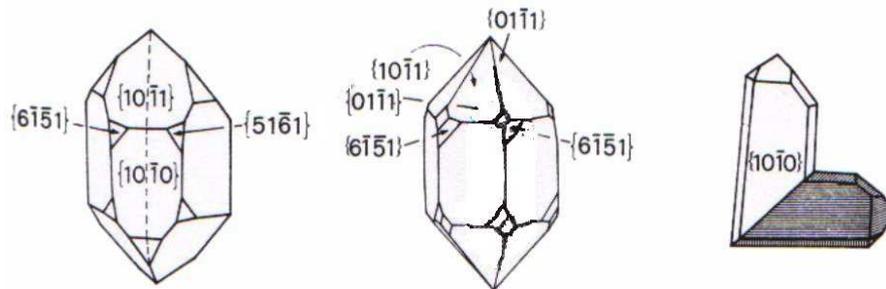
## **QUARTZ**

### **Macles par mériédrie due au polymorphisme**

Ce type de macle existe dans la très grande majorité des cristaux de quartz. Elles sont dues à la transition polymorphique entre les quartz  $\alpha$  et  $\beta$  à  $573^\circ$ .

Toutefois, elles ne sont pas observables macroscopiquement, et je vous renvoie au 5.1.1.

### Macles par mériédrie réticulaire



Célèbres macles du quartz (de gauche à droite : macle du Brésil, du Dauphiné, du Japon)

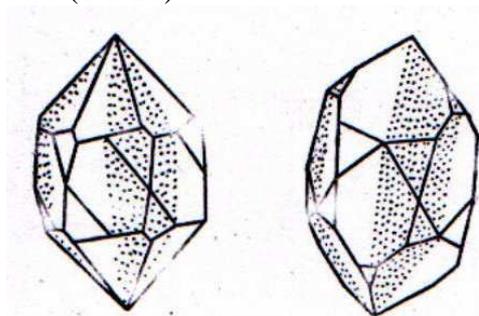
#### - Macle du Dauphiné (ou de Suisse)

Elle est due à l'accolement de deux cristaux de même géométrie (gauche ou lévogyre, ou bien droit ou dextrogyre) selon leur axe ternaire. L'un des cristaux ayant subi une rotation de  $180^\circ$  par rapport à l'autre autour de l'axe  $L^3$ .

#### - Macle du Brésil

De formation similaire à la macle du Dauphiné, elle s'en différencie par le fait que les cristaux formant la macle sont miroirs l'un de l'autre (1 lévogyre, et 1 dextrogyre).

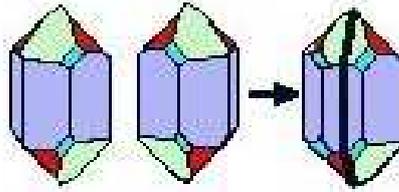
Le plan de macle est alors la face (1-1-20)



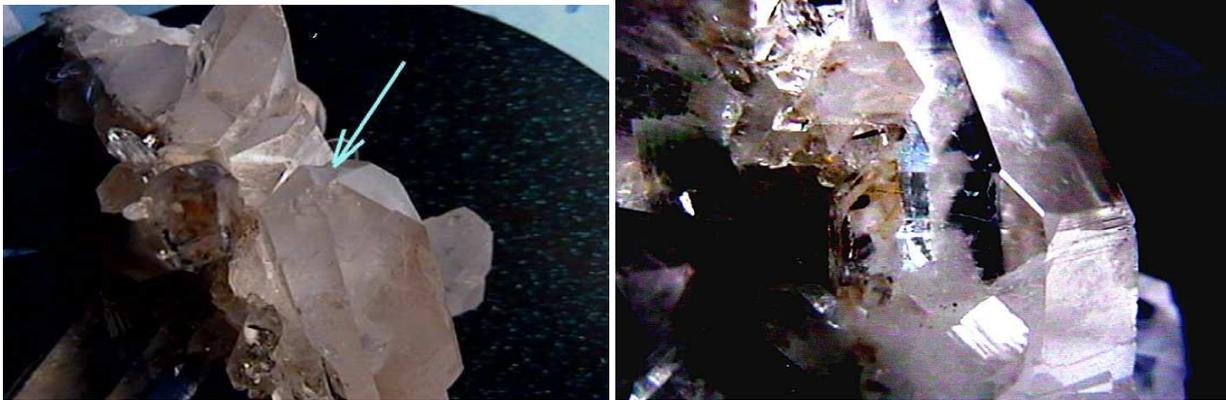
formation d'un quartz maclé à partir de deux quartz non symétriques (individu en blanc et individu 2 en pointillés)

-à gauche : deux quartz de même rotation donnent la macle du Dauphiné

à droite : deux quartz de rotation différente donnent la macle du Brésil



formation d'un quartz maclé à partir d'un quartz droit et d'un quartz gauche – Macle du Brésil



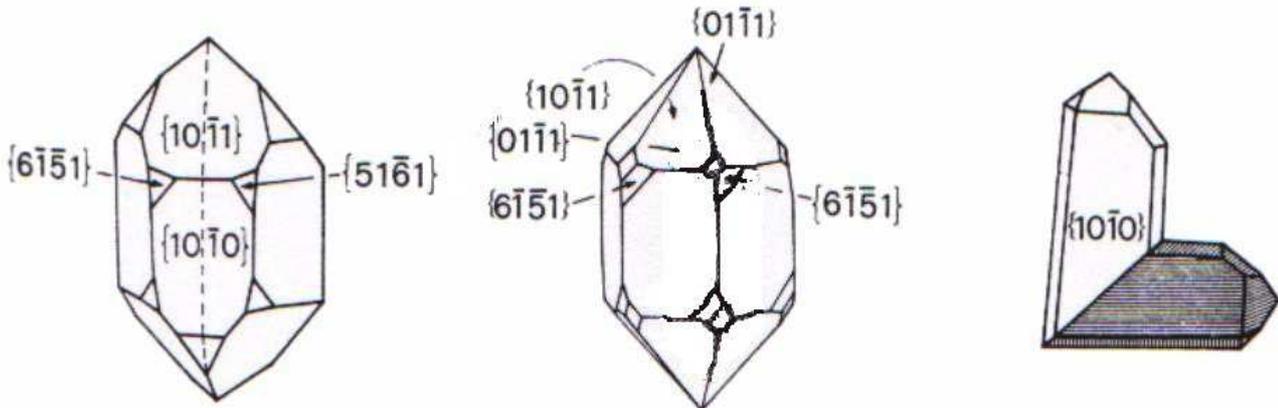
remarquez l'angle rentrant sur le gros cristal de quartz, ce "cristal" a tous les critères d'une macle : taille supérieure à ces voisins, forme très aplatie, angle rentrant et faces  $(6-1-51)$  et  $(51-61)$  présentes, c'est une très belle mâle du Brésil dans un échantillon avec plusieurs quarts bi terminés de 10 cm.

- Macle du Japon ou de la Gardette

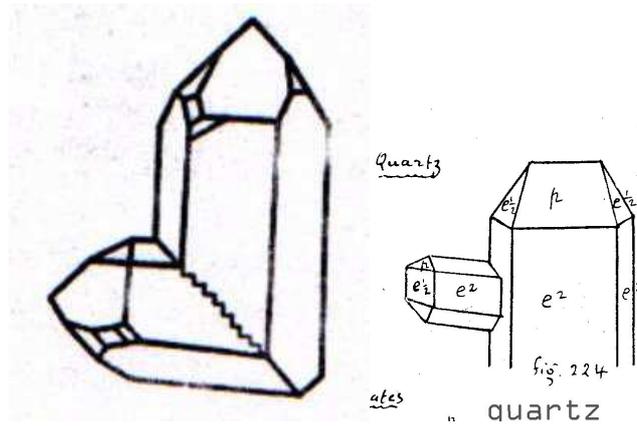
Le quartz ne possède pas que des macles par mériédrie ; ainsi la macle de la Gardette est due à la symétrie presque quadratique d'une maille multiple. Le plan d'accolement est  $(11.2)$  et les individus forment un angle de  $84^{\circ}33'$ .

Ainsi l'obliquité n'est pas nulle et la multiplicité supérieure à 1. La macle de la Gardette est donc le cas le plus général, c'est à dire celui d'une pseudosymétrie réticulaire.

Il en résulte également la présence de contraintes mécaniques internes à la jonction des individus qui est mis en évidence par l'aspect laiteux de cette jonction.



Célèbres macles du quartz (de gauche à droite : macle du Brésil, du Dauphiné, du Japon)



Macle de la Gardette

présence d'un aspect laiteux le long du plan de macle dû à des contraintes mécaniques internes



- a) Macle de quartz du japon ou de la Gardette (échantillon chinois de 8 cm: macle excessivement plate, avec un angle proche de  $120^\circ$  ( $116^\circ 12'$ ))
- b) Quartz de l'Oisans présentant la macle de la Gardette



macle du japon dans un ensemble de cristaux de quartz : macle 7cm , Pérou  
type de macle F avec net gauchissement des individus



Macle de La Gardette : mine de La Gardette  
Type de macle G



3 macles du Japon dans un même ensemble: pièce 7cm , Pérou  
type de macle E et C-D, type de macle B

## NOTA

Il est à noter que d'autres plans autre que le  $\{11-2\}$ , peuvent aussi être plans de macle pour des macles par accolement selon les faces p des individus :

- macle de Zwickau , angle de  $42^{\circ}17'$
- macle de Goldschmidt, angle de  $47^{\circ}43'$
- macle de Breithaupt, angle de  $48^{\circ}54'$ , par contact selon le plan  $\{11-1\}$
- macle de Friedel, angle de  $90^{\circ}$ , selon le plan  $\{44-1\}$  avec rotation de  $45^{\circ}39'$
- macle de Reichensten-Grieserenthal, angle de  $76^{\circ}26'$ , selon le plan  $\{10-1\}$  avec rotation de  $180^{\circ}$
- macle de Sella, angle de  $64^{\circ}50'$  selon le plan  $\{10-2\}$

Bien que plus rare que les macles de La Gardette, l'existence de ces macles montrent que bon nombre des plans réticulaires du quartz sont susceptibles de devenir plan de macle. Il est donc possible que tous les tétraèdres du réseau soient sensibles à un seul et même type d'impuretés. Les alcalins pourraient bien être la cause réelle de ces macles.

### 8.4 Système hexagonal

Emmanuel FRITSCH présente quelques macles dans le système hexagonal, quoique peu nombreuses  
Pour ma part, je n'en connais aucune.

Il est vrai que ce système ne renferme que peu de minéraux naturels.

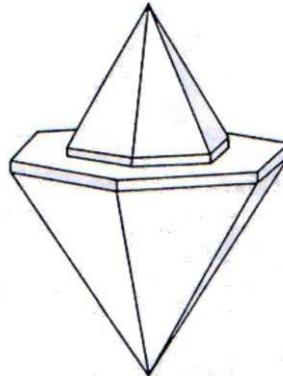
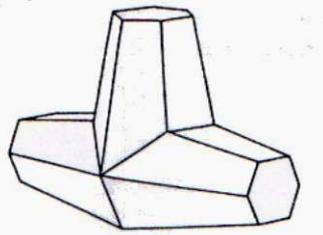
Plan basal : quelques macles de l'hémiédrie non centrée : zincite.

Plan pyramidal : (11.21) graphite, apatite, (10.12) pyrrothite, (30.34) iodyrite, (1.101) breithauptite et quelques autres macles rares, toutes des cas particuliers.

Souvent, un axe deux ou quatre a tendance à apparaître perpendiculairement à l'axe sénaire.

Pas d'exemple de plan prismatique ni d'axe de macle connu dans les minéraux hexagonaux naturels.

NOM	SYSTEME	TYPE DE MACLE
Apatite	Hémiédrie centrée 6/m	
Graphite	Holoèdre 6/m 2/m 2/m	Sur {11.21}
Pyrrothite	Holoèdre 6/m 2/m 2/m	Sur {10.12}
Zincite	Hémièdre hémimorphe	



### 8.5. Système orthorhombique

Sur plan basal : topaze (010), hémimorphite (001), epsomite, perovskite et boracite pseudocubiques.

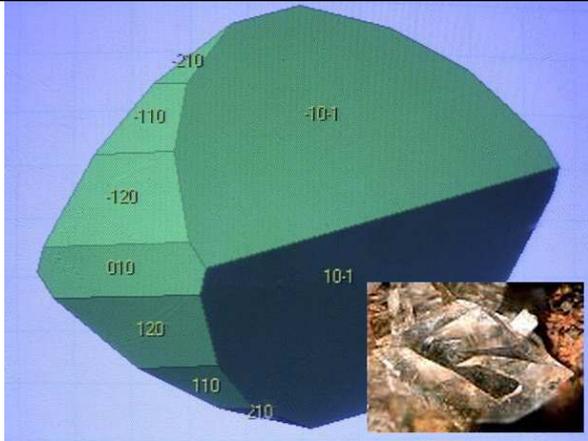
Sur plan prismatique : (110) la plus courante mène le plus souvent à un édifice pseudohexagonal : carbonates orthorhombiques : alstonite, aragonite, cérusite, strontianite, withérite... ainsi que dans la chalcocite, la cubanite, la cordiérite, le soufre, l'argyrodite, la hambergite, l'atacamite, la thénardite.

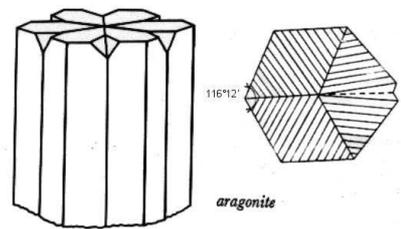
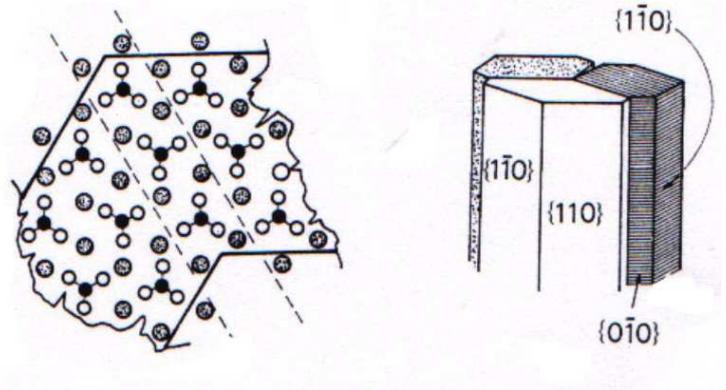
Dans la bournonite, on a un groupement pseudoquadratique, (130) dans la cérusite (macle en coeur), la bertrandite, le chrysobéryl, l'olivine, la cordiérite, la sternbergite, la stibine qui donnent une macle multiple à symétrie pseudohexagonale.

(120) Dans l'anhydrite et la cotunnite.

Très peu de macles sur des plans pyramidaux, mais quelques-unes existent sur des minéraux assez répandus :

- (011) soufre, anydrite, thénardite
- (112) chalcocite
- (544) atacamite
- (101) marcasite, orthopyroxènes.

NOM	SYSTEME	TYPE DE MACLE
ADAMITE	Orthorhombique holoèdre	
Aragonite	Orthorhombique Holoèdre 2/m2/m2/m	<p>L'aragonite se macle sur les faces {110} par hémitropie par rapport à un plan.</p> <p>Dans l'aragonite, orthorhombique, l'angle dièdre des faces m, est égal à 116°12', donc voisin de 120°. Paraccolement de trois prismes avec m comme plan de jonction, on obtient une macle qui a l'apparence d'un cristal unique de symétrie pseudo hexagonale .</p> <p>Du fait de l'obliquité résultant de la différence entre 116°12' et 120°, la structure de la jonction conduit au déplacement des atomes proches du plan de jonction.</p>

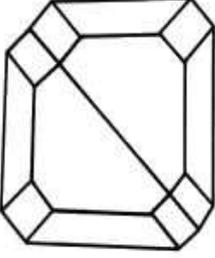
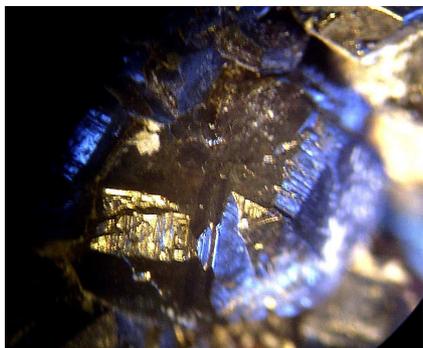
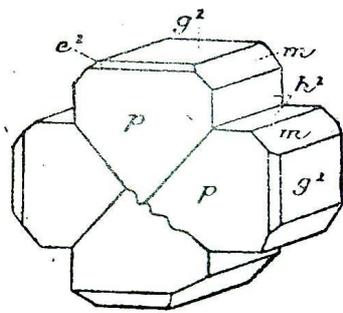


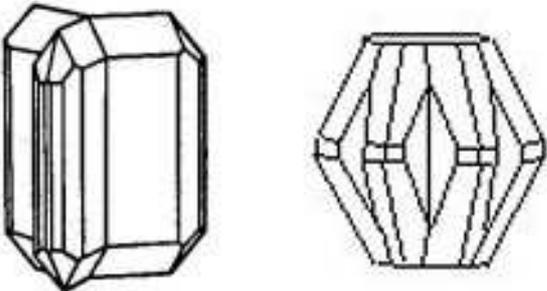
Macles sur  $\{110\}$  très courantes , souvent triples, simulant un prisme hexagonal ; ou macles par accolement ou pénétration en fines lamelles polygénétiques qui apparaissent comme des stries sur  $\{001\}$

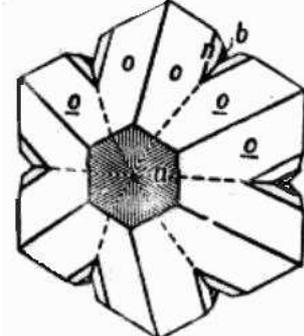
Macle multiple selon  $\{110\}$ , chaque cristal prismatique étant combinaison de  $\{110\}$  et  $\{001\}$

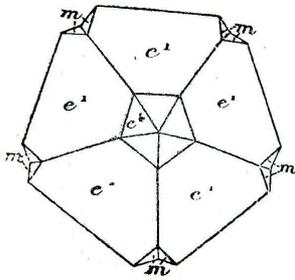
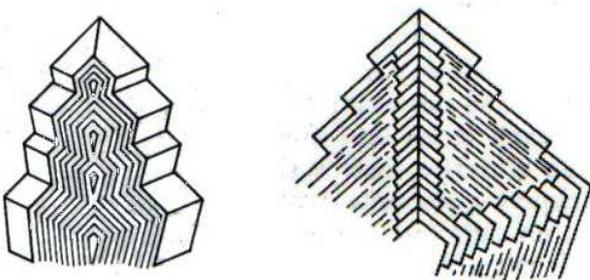
Macle selon de  $\{110\}$  de prismes combinaisons de  $\{010\}$ ,  $\{110\}$  et  $\{011\}$



<p>Bournonite</p>	<p>Orthorhombique hémièdre hémimorphe mm2</p>	<p>Selon {110} souvent répétées</p> <p>La macle de la bournonite crée un axe d'ordre 2 (ou 4) central, qui donne à la macle l'allure d'un cristal du système cubique.</p>   <p style="text-align: center;"><i>bourbonite</i></p>  <p>Les macles multiples sont dites « en engrenage » relativement à leurs formes</p>  <p style="text-align: center;">bourbonite St Laurent le Minier 5 mm et 4 mm</p>  <p style="text-align: center;">maclé suivant une face m et aplati suivant p</p>
-------------------	---	--

<p>Cérusite</p>	<p>Orthorhombique 2/m2/m2/m</p>	<p>Principalement, la cérusite forme des macles de 2 ou 3 individus, parfois cycliques sur les plans {110}</p>  <p>macles de la cérusite</p> <p>{110} sur le prisme vertical (plus rarement {130}), très fréquentes et souvent multiples, aboutissant à un aspect d'étoile ou de réseau</p>   <p>Fig. 69 : macles de la cérusite Touissit (Maroc) 7 cm et 6 cm</p>
-----------------	-------------------------------------	---

<p>Chrysobéryl</p>	<p>Orthorh 2/m 2/m 2/m</p>	<p>Sur {130} fréquentes, souvent multiples et mimétiques formant des pseudo hexagones</p>  <p>Macle cyclique du chrysobéryl parallèle aux faces {031}</p>   <p>Macle cyclique du chrysobéryl parallèle aux faces {031} Madagascar 10 mm</p>  <p>Macles de chrysobéryl (Valle Aurina- Italie (20 mm))</p>
--------------------	----------------------------	--

Columbotantalite	Orthor $2/m2/m2/m$	Selon $\{201\}$ courantes
Cordiérite	Orthorhombique holoèdre $2/m2/m2/m$	Souvent pseudohexagonaux par maclage multiple sur $\{110\}$
Enargite	Orthorhombique $mm2$	Selon $\{320\}$ courantes
hémimorphite	Orthorhombique hémioèdre $2mm$	Selon $\{001\}$
Marcassite	Orthorhombique holoèdre $2/m 2/m 2/m$	<p>Les macles de marcassite sont assez fréquentes, et souvent multiples.</p> <p>La multiplicité de macles selon un plan <math>m</math> conduit à la formation d'une structure ressemblant à une crête de coq.</p>  <p>sperkise</p> <p>De plus, il arrive que 4 ou 5 individus peuvent former une macle cyclique autour d'un axe central (axe de macle parallèle à <math>c</math>), formant ainsi ce que l'on appelle la macle de la sperkise (ancien nom de la marcassite toujours utilisé dans le Nord</p>  <p>macle en crête de coq (à gauche) et en sperkise (à droite) de la marcassite</p>

		 <p data-bbox="831 1041 1284 1099">sperkise : macle cyclique de la marcassite (cap blanc nez)</p>
Pérovskite	2/m 2/m 2/m	Macles polygénétiques
Strontianite	Orthorhomb 2/m2/m2/m	Macles sur leprisme {110} fréquentes

## 8.6. Système quadratique

### Macles par rapport à un axe

On peut avoir transformation d'un axe inverse d'ordre 4 (tétraèdre quadratique ou sphénoèdre de la chalcopyrite) en axe 4 vrai.

Il existe également des macles polysynthétiques selon trois directions perpendiculaires, donnant une symétrie globale cubique. Exemple : la leucite.

### Macles par rapport à un plan

Sur le plan basal : espèces appartenant à l'hémiédrie non centrée : wulfénite.

Sur le plan pyramidal : (112) est la plus courante : chalcopyrite, stannite, braunite, anatase, hétérolite ;

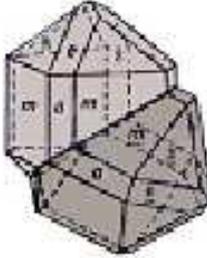
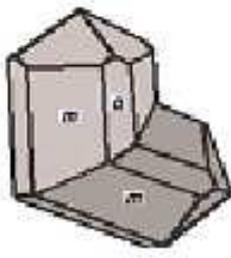
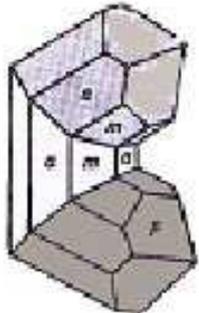
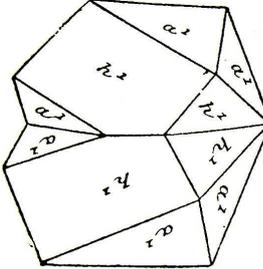
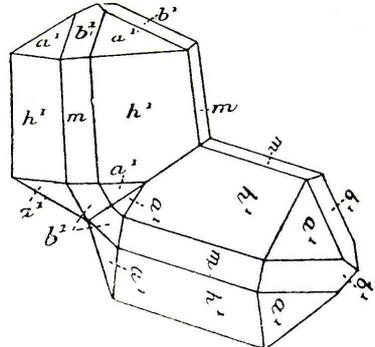
(101) est la plus connue : cassitérite (bec de l'étain), rutile (macle en genou), zircon, tapiolite ;

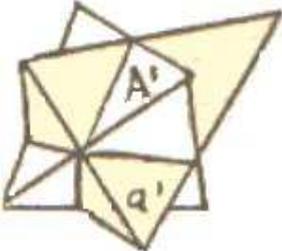
(301) rutile (macle en coeur)

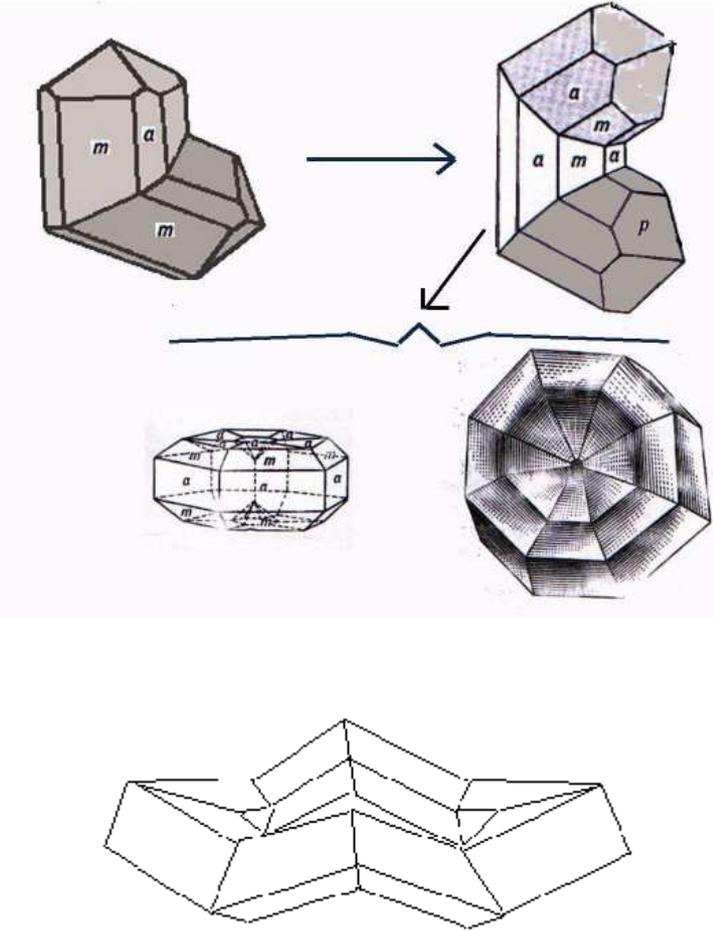
(102) chalcopyrite : stannite.

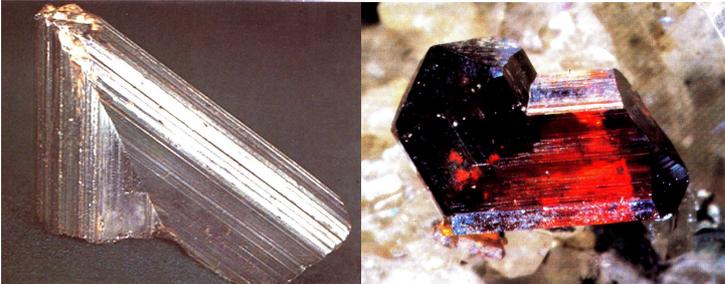
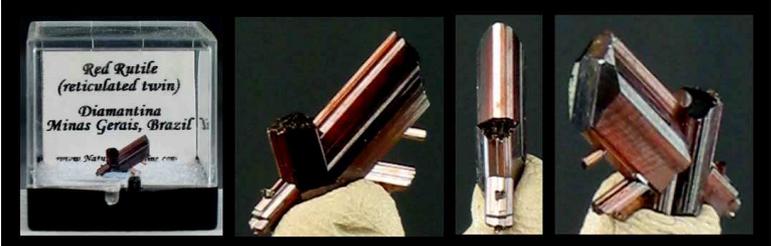
Macles sur un plan prismatique, rares (110) cannite, scheelite.

NOM	SYSTEME	TYPE DE MACLE
Apophyllite	Quadratique holoèdre 4/m 2/m 2/m	 <p>macle par pénétration (mêmes faces (100) (010) (110))</p>
Braunite	Quadratique (hémièdre tétraédrique) -42m	Sur {112}

<p>Cassitérite</p>	<p>Quadratique holoèdre 4/m2/m2/m</p>	<p>Macles fréquentes sur {101}, souvent multiples, La cassitérite forme la macle en bec de gaz</p>     <p>Différentes macles de la cassitérite En haut à gauche : macle en bec de gaz Au centre à gauche : macle en genou qui par multiplication peut former une macle cyclique avec un axe sénaire, présentée en dernière ligne</p>   
--------------------	---	---

		 <p>Cassiterite Pérou 40x40 mm Mcle en genou et macle multiple</p>
<p>Chalcopyrite</p>	<p>Quadratique -4 2m</p>	<p>Sur {112}</p> <p>Les cristaux de chalcopyrite présentent fréquemment l'antihémiédrie sous la forme de sphénoèdre ou de disphénoèdre. Les macles des deux sphénoèdres a1 et A1 sont fréquentes</p>  <p>macle de chalcopyrite constitué de 2 sphénoèdres</p>

		<p>Macle de contact</p> 
<p>Rutile</p>	<p>Quadratique 4/m2/m2/m</p>	<p>Macles fréquente sur 101, souvent multiple, cyclique formant des anneaux de 8 individus</p>  <p>Le rutile (quadratique holoédrique) présente néanmoins de très jolies macles avec <math>b^1</math> (101) comme plan de macle.</p>

		<p>Il s'agit ici de macle par pseudo-mériédrie réticulaire.</p> <p>Par multiplication de la macle, il peut apparaître une macle cyclique avec un pseudo axe sénaire perpendiculaire à <math>m</math> (010), comme si le réseau du rutile constituait une mériédrie d'un réseau multiple, comportant un axe quaternaire et un axe sénaire orthogonaux.</p> <p>Le rutile forme donc principalement :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- la macle en genou</li> <li>- la macle des pyramides du bec de gaz</li> <li>- une macle cyclique</li> </ul> <div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center;">  </div> <p style="text-align: center;">Rutile et quartz (Oisans) – 1,5 mm</p> <div style="display: flex; justify-content: center; align-items: center;">  </div> <p style="text-align: center;">Rutile Minas Gerais – 3 mm</p>
Scheelite	Quadratique- Hémiédrie centrée 4/m	Par pénétration sur le prisme $\{110\}$ fréquentes

### 8.7. Système cubique

#### Macles par rapport à un axe

Rotation de 60° par rapport à un axe ternaire : très commune, correspond à un plan de macle (111) lorsqu'elle est par contact (macle dite « des spinelles »).

Rotation de 90° par rapport à un axe binaire d'une hémiedrie restaurant un axe quaternaire : tétraédrite, diamant (macle de Mohs-Rose, discutée), eulityte, helvite.

#### Macles par rapport à un plan

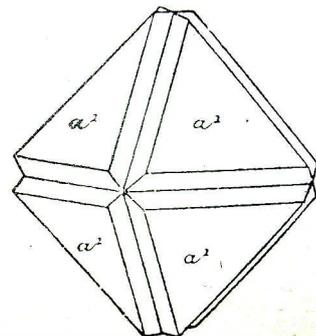
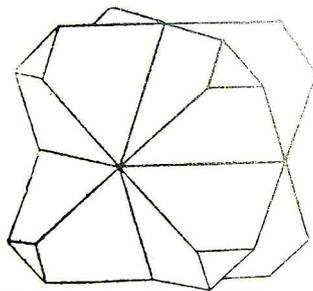
Macle suivant (011).

Restaure également les axes quaternaires : pyrite (croix de fer), skutterudite, cobaitite.

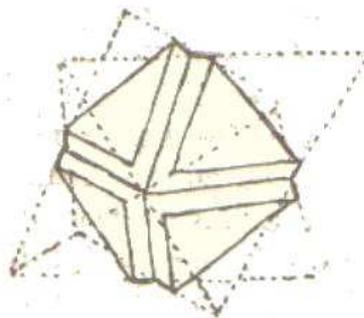
NOM	SYSTEME	TYPE DE MACLE
Argent	Cubique 4/m –3 2/m	Sur l'octaèdre {111}
Cuivre	Cubique 4/m –3 2/m	Sur {111} parfois
Cuprite	Holoèdre 4/m –3 2/m	

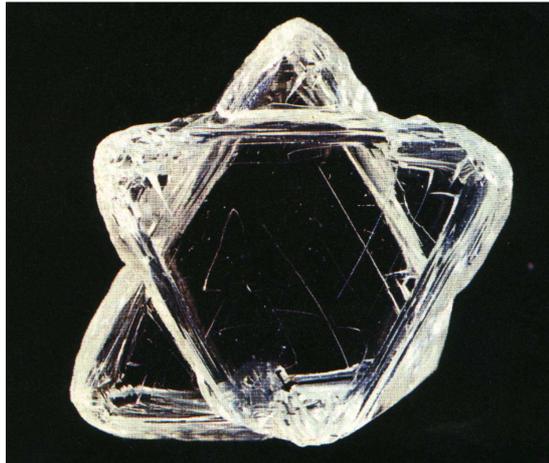


Diamant	Cubique $4/m - 3 2/m$	<p>Macle par hémitropie moléculaire, associant deux tétraèdres à arêtes croisées, avec leurs angles abatus par les tétraèdres inverses.</p> <p>Les faces des cristaux de diamant sont souvent arrondies avec des arêtes courbes et striées.</p> <p>Les macles de diamant sont généralement constituées de 2 tétraèdres qui se pénètrent à angle droit. Il en résulte une symétrie cubique avec des angles rentrants.</p> <p>Parfois les tétraèdres sont épointés par les faces du tétraèdre inverse et il, y a apparition d'un octaèdre dont les arêtes sont remplacées par des gouttières. Les diamants maclés peuvent avoir 2 sortes de déformations de cristallisation : interne ou externe. Il existe donc des macles simples par accollement et des macles multiples par interpénétration multiple que l'on appelle (naat).</p>
---------	-----------------------	--



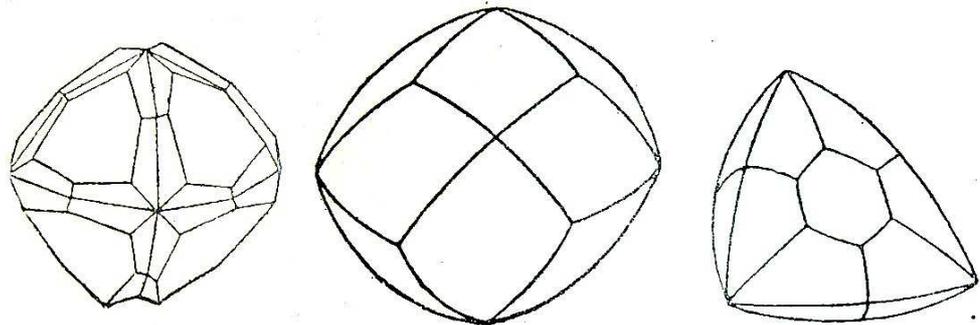
macle du diamant à partir de deux tétraèdres avec faible développement avec fort développement, pour se rapprocher de la symétrie octaédrique



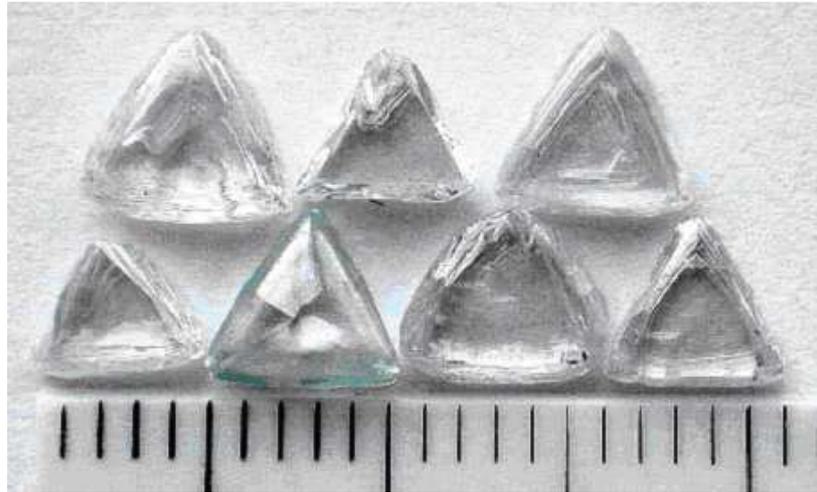


Macle du diamant par interpénétration de 2 tétraèdres

La même macle à partir de deux hémihexoctaèdres conduit à au faciès de gauche ci-dessous. Les formes courbes abondent (fig. centrale ci-dessous, qui représente le dodécaèdre. Dans la figure de droite ci-dessous, deux portions d'un hémihexoctaèdre tronqué par  $a^1$  sont maclées, avec  $a^1$  pour face de jonction.



Selon la macle de spinelle, macle multiple



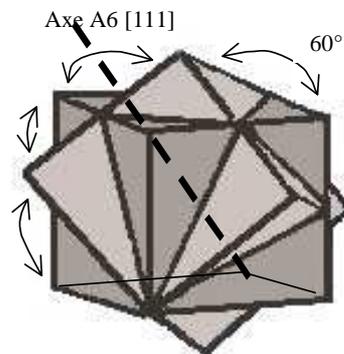
Fluorite

Cubique  $4/m\bar{3}2/m$

Par interpénétration fréquente avec  $[111]$  comme axe de macle

Le cas le plus représentatif de ce type de macle par mériédrie réticulaire, est la macle par pénétration de la fluorine

L'axe ternaire du système cubique  $[111]$  (grande diagonale du cube) devient axe sénaire (axe d'ordre 6), et il y a formation de la macle par rotation de  $60^\circ$  autour de cet axe.





Macle (00.1) de la fluorine

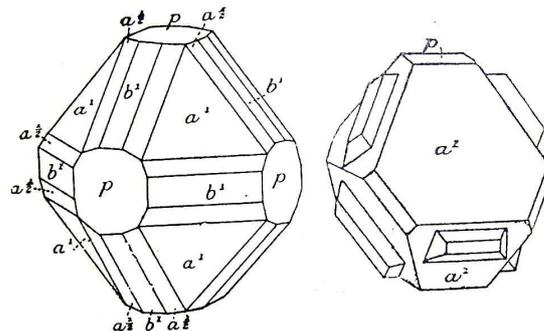
Galène

Cubique  $4/m - 3 2/m$

Sur  $\{111\}$  macle de croissance  
Et également sur  $\{114\}$



Les macles sont fréquentes par hémitropie normale à  $a^1$ . Souvent les individus de la macle, munis des faces  $p$  et  $a^1$ , sont aplatis suivant une face  $a^1$  et donnent l'habitus de droite ci-dessous. Cette même macle tabulaire se reproduit avec la forme  $a^1 b^1$ .



Cristal de galène  $a^1 b^1$  qui peut conduire à la macle tabulaire

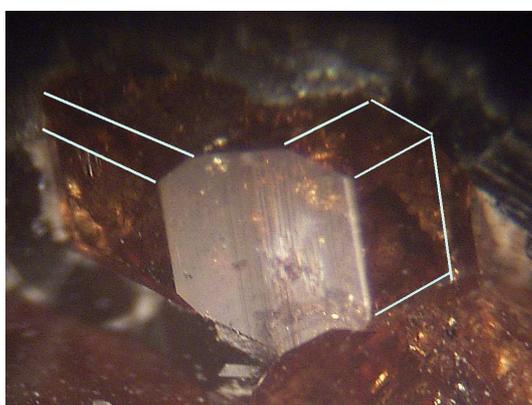
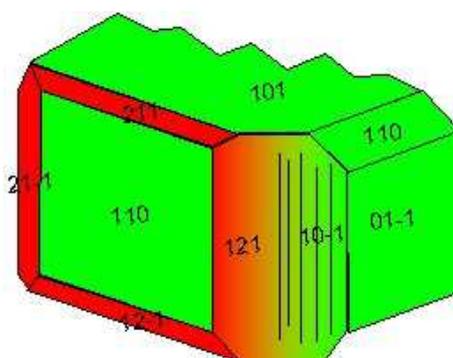
Grenat Hessonite  
Grenat Almandin

Cubique  $4/m - 3 2/m$

Sur  $[110]$



Autre :

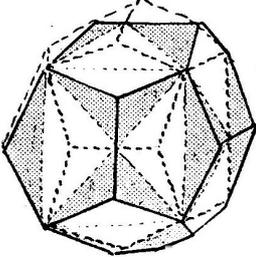
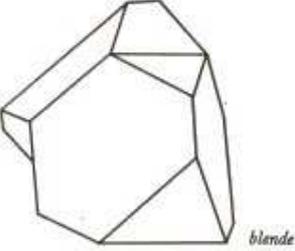


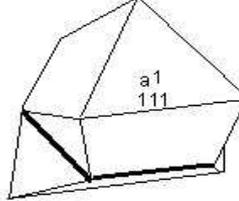
macle observée

sur un grenat du Pakistan (0,5 mm) sur un almandin de Collobrières (30 mm)

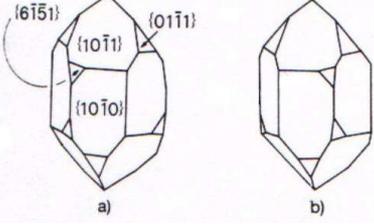
Stries qui présentent le plan de macle

Magnétite	Cubique $4/m \bar{3} 2/m$	Macle du spinelle selon $\{111\}$
Or	Cubique $4/m \bar{3} 2/m$	Sur 111 fréquentes

<p>Platine</p>	<p>Cubique <math>4/m - 3 2/m</math></p>	 <p>Russie</p>
<p>Pyrite</p>	<p>Cubique <math>2/m - 3</math></p>	<p>De croissance selon un axe <math>[110]</math></p>   <p>Macle méridienne d'interpénétration, classe <math>m-3</math> Pièce du Colorado (12 mm)</p>
<p>Sphalérite</p>	<p>Cubique <math>-4 3m</math></p>	<p>111 fréquentes par accollement ou pénétration Ce minéral est maclé selon un plan de jonction <math>a_1</math></p>   <p>macle par contact de la blende</p>
<p>Spinnelle</p>	<p>Cubique <math>4/m - 3 2/m</math></p>	<p>Sur 111 fréquentes macle du spinelle, 2 individus par accollement prenant l'aspect d'une plaquette orientée selon (111)</p> <p>Elle est due au développement de deux octaèdres suivant un plan parallèle à l'une des faces de l'octaèdre. L'axe</p>

		<p>d'hémitropie est alors un axe de symétrie ternaire</p> <p>1er octaèdre 2ème octaèdre plan de macle</p>   <p>Macle des spinelles</p>  <p>spinelle , 3 mm, MOGOK, BURMA</p>  <p>macle multiple – macle simple</p> <p>Cette association existe lors de l'interpénétration de deux cubes sont l'un des axes ternaires (axe d'hémitropie) leur est, commun et où l'un des cristaux a subi une révolution de 180° par rapport à l'autre. L'axe <math>L_6^3</math> devient alors un axe <math>L_6^6</math>, et on obtient alors la macle de la fluorine</p>
Tennantite	Cubique -43m	
Tétraédrite	Cubique -43m	<p>Souvent imbriquées ou recouvertes de chalcopryrite</p> 

## 9. LEXIQUE

Macle	<p>Henri-jean SCHUBNEL : <b>groupement de deux ou de plusieurs cristaux de même nature suivant des lois déterminées</b></p> <p>Emmanuel FRITSCH : association, suivant des lois géométriques bien définies, de deux individus d'une même espèce minérale, due à l'existence d'un réseau commun (ou presque commun) aux deux cristaux d'orientations différentes.</p> <p>Alain BARONNET : associations de plusieurs individus de même espèce, orientés mutuellement selon des lois cristallographiques rigoureuses</p>
Angle rentrant	Par opposition aux angles saillants qui apparaissent sur les polyèdres monocristallins (cf loi de constance des angles de Sténon et Romé de Lisle)
Macles simples	Association de 2 individus
Macle multiple	Association de plus d e2 individus – donnent des groupements cycliques ou étoilés
Obliquité	Angle qui peut exister entre les plans réticulaires de deux cristaux d'une macle (elle est de l'ordre de 2à 5° environ)
Indice de la macle	Nombre d'atomes nécessaires pour définir le motif de la macle par rapport au motif d'un cristal pris isolément
Eléments de macle	Eléments de symétrie d'orientation permettant le passage d'un cristal à l'autre dans la macle (axe, plan)
Transformation polymorphique	Passage à l'état solide entre une phase haute température A et une phase de plus basse température (modification de la structure du réseau cristallin)
Réseau réciproque	<p>Représentation du réseau cristallin sur les clichés de diffraction</p> <p>Un traitement mathématique par transformées de Fourier permet ensuite de revenir à la structure réelle d'un cristal</p>
<p>Quartz gauche a)</p> <p>Quartz droit b)</p>	
Mériédrie :	<p>Si la symétrie du contenu de la maille, c'est-à-dire le motif, est inférieure à celle de la maille vide, il y a méridrie.</p> <p>Les groupes trigonaux sont à la fois des méridries rhomboédriques et des méridries hexagonales car ce sont des sous-groupes de m-3m et de 6/mmm.</p>
Symétries :	<p>Holoédrie : Symétrie maximale d'un système de Bravais, elle est représentée par le groupe ponctuel de la maille vide</p> <p>Hémiédrie : Symétrie moitié de celle du groupe de holoédrie dans le cas d'in groupe méridrique</p> <p>Tétartoédrie : Symétrie quart de celle du groupe de holoédrie dans le cas d'in groupe méridrique</p>

## REFERENCES

- 1-Henri-Jean SCHUBNEL : avec la collaboration de J.F. POULLEN et J. SKROK : Larousse des minéraux, Librairie Larousse Paris
- 2- Emmanuel FRITSCH, « Connaître les macles », Monde et minéraux N°77, 1987, pp17-19.
- 3- Emmanuel FRITSCH, « Connaître les macles », Monde et minéraux N°78, 1987, pp45-49.
- 4- Emmanuel FRITSCH, « Comprendre les macles : une question de symétrie », Le Règne minéral, N°29, 1999, pp47-51.
- 5- Roger TITEUX : Sur la croissance dans le minéral et le vivant, monde et minéraux, N°81, 1987, pp43-44.-èyun
- 6- Alain BARONNET : Minéralogie , 1988, chez Dunod
- 7- P. BARIAUD, F. CESBRON et J. GEFFROY : Les minéraux, leurs gisements, leurs associations
- 8- M. PICON, Eléments de Minéralogie, Cours professé à la Faculté de Pharmacie de Paris, Centre de Documentation Universitaire, 1945
- 9-W. A. DEER F.R.S., R.A. HOWIE et J. ZUSSMAN : An introduction to the rock-forming minerals, Longman Scientific & technical, copublished in the US with John Wiley & sons, inc, New York
- 10- C. KLEIN, C. S. HURLBUT Jr, Manual of Mineralogy
11. H. BRASSEUR « Cristallographie – Morphologie, université de Liège, édité par F. Gothier, 11 place du 20 août, Liège.
12. C. GIACOVAZZO et al, Fundamentals of crystallography, International union of crystallography, oxford science publications
13. PRECIS DE MINERALOGIE, A. DE LAPPARENT, librairie scientifique et technique Albert BLANCHARD, Paris, 1965

De nombreuses photos sont issues du livre « Le monde des cristaux) de Vincenzo de Michele, conservateur de minéralogie au musée municipal d'histoire naturelle de Milan, ed. Atlas

## **ANNEXE : article de E. FRITSCH**

*Il y a macle lorsque les réseaux de cristaux imbriqués peuvent se prolonger l'un l'autre, au moins en partie ou de façon approchée. Un nombre limité de groupements est possible ; nous avons dans cet article commencé dans « Monde et Minéraux » n' 77 tenté d'en décrire les grands types, pour chaque système cristallin.*

**ATTENTION: UNE MEME ESPECE PRESENTE SOUVENT PLUSIEURS MACLES**