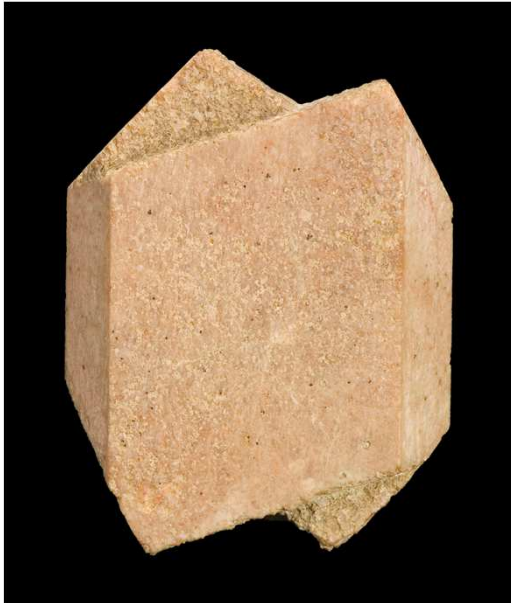


Les macles : des défauts souvent beaux et parfois utiles



Bernard Capelle
IMPMC

LES ORIGINES

- Le mot cristal d'origine grecque (**krustallos**) signifie « solidifié par le froid ». **Les grecs pensaient que le cristal de roche, le quartz, provenait de la transformation de la glace par le froid.** Le nom de Krustallos (cristal) a été donné au « quartz » par Strabon (géographe Grec, 64 av. JC mort entre 21 et 25 ap. JC) .
- Andreas Libavius (1550-1616) chimiste et médecin allemand écrit **le premier livre de chimie** systématique. Il fait le rapprochement entre **la forme angulaire des sels et celle du cristal (le quartz)** et étend le **nom de cristal aux sels.**
- Au cours du 18^e siècle le terme de **cristal remplace** celui de **Pierre angulaire.**
- Le mot «**Cristallographie**» (ou description des cristaux) est introduit pour **la première fois en 1723** par **Maurice-Antoine Capper** (1685-1769).
- A l'origine, la cristallographie était purement descriptive et constituait une branche de la minéralogie. Par la suite on a constaté que l'état cristallin n'était pas réservé aux minéraux et que c'était **un état de la matière très répandu.**

Depuis très longtemps on pense que la forme extérieure des cristaux est liée à un ordonnancement interne régulier de la matière. La première loi quantitative de la cristallographie, **la loi sur la constance des angles**, a été pressentie par le Danois Nicolas Sténon en 1669 à partir de mesures des angles entre les faces de cristaux de quartz.

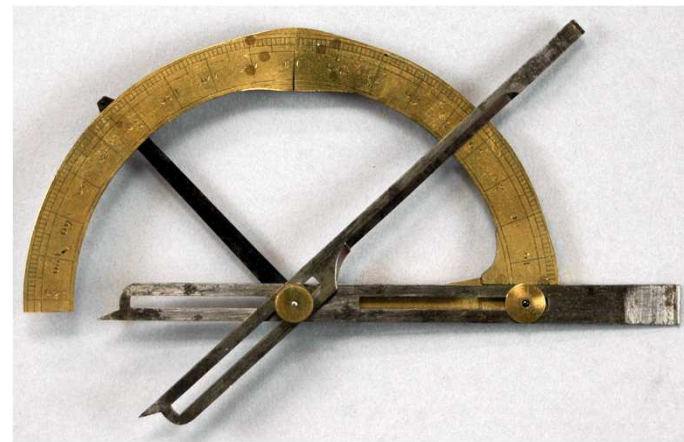
[Jean-Baptiste Romé de l'Isle \(1736-1790\)](#) reprend les travaux de Sténon et introduit des notions de formes primitives et troncatures dans son Essai de Cristallographie de 1772, puis dans sa Cristallographie de 1783.

1783 : Cristallographie ou description de toutes les formes propres à tous les corps du règne minéral

C'est dans cet ouvrage que [Jean-Baptiste Romé de l'Isle](#) jette les bases de la cristallographie moderne.



Gabarits utilisés par Carangeot



Goniomètre de Carrangeot

Les nouvelles notions que [Jean-Baptiste Romé de l'Isle](#) a introduites et les résultats des mesures de Carangeot l'amène à énoncer un certain nombre de loi et principes.

Premier principe de la cristallographie

« Il n'est donc aucune des substances propres au Règne Minéral qui puisse se soustraire aux lois de la cristallisation »

Loi de constance des angles

« il est une chose qui ne varie point, et qui reste constamment la même dans chaque espèce ; c'est l'*angle d'incidence* ou l'*inclinaison respective des faces entre elles* ».

Principe de convexité des cristaux

« Quand, dans un cristal, il se trouve un ou plusieurs angles rentrants, on doit conclure que ce n'est point un cristal simple, mais un groupe de deux ou plusieurs cristaux, ou même de deux moitiés retournées d'un même cristal. Ce cristal prend alors le nom de macle. »

Pourquoi ce nom macle?



Calcite de Chine

Quartz



Pourquoi ce nom macle?

En 1751 Christophe Paul Gautron, sieur de Robien (1678-1756), publie un petit ouvrage intitulé « Nouvelles idées sur la formation des fossiles » suivi d'une « [Dissertation sur la formation des trois différentes pierres figurées qui se trouvent dans la Bretagne](#) ».

« Ces pierres, ou cristaux pierreux ... se sont présentés et déposés confusément les uns sur les autres ... se sont confondus au centre et ont formé par le dessèchement ces trois croix pierreuses ... ; lorsqu'elles se sont précipités de travers, [elles se sont unies](#) ... et ont formé des sautoirs ou croix de Saint-André, plus ou moins régulièrement, et c'est [cette confusion et le hasard des rencontres](#) qui ont causé toutes les variétés. »



« croix grecque »



« croix de saint André »

Pourquoi ce nom macle?



Les minéraux groupés en croix étaient désignés sous les termes de **pierres de croix** ou lapis crucifer. Les plus beaux apparaissent sous la forme de **deux cristaux allongés et interpénétrés**, certains groupement ont la forme d'une croix grecque, d'autres celles d'une croix de Saint-André.

Ce type de groupement apparaît pour la **staurolite** ou **staurotide**.

Elle a été **décrite en 1792** par le minéralogiste français **Jean-Claude Delamétherie**, qui lui a donné le nom de **staurolite**, du grec stauros (« pieu pour une palissade », « pieu pour le supplice », d'où « croix ») issu de la racine indoeuropéenne sta (« être debout »). **René Just Haüy** a tenté de la rebaptiser **staurotide**, mais l'antériorité de Delamétherie a été reconnue.

**Ici aussi,
on a la Croisette !**

La staurotide, ou croisette de Bretagne, un petit minéral naturel devenu pierre sacrée.
Bretagne, terre de légendes...

BRETAGNE
PASSEZ À L'OUEST



Pourquoi ce nom macle?

Aux pierres de croix (staurolite) **Gautron de Robien** a adjoint dans son étude, **des cristaux d'andalousite** qu'il décrit comme « *des espèces de quilles ou **lardons carrés** plus ou moins longs, mais exactement carrés dans toute leur longueur... **Le sommet paraît traversé d'une croix bleuâtre**, à peu près comme les pierres de croix des environs de Compostelle en Galicie, dont la quille est cylindrique ou plus souvent conique, au lieu que celles de **nos pierres des Salles de Rohan**, sont toujours exactement carres ou en losange... **On les nomme pierres de macles**, à cause de la ressemblance **des macles ou losanges percés** qui composent les armes de la maison de Rohan* ».

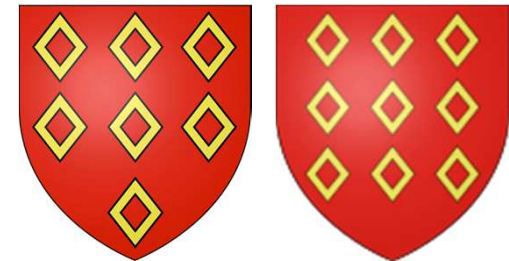
Texte publié en 1751



Andalousite - Tyrol Autriche (7,4x6,2 cm)



Sections polies de prismes d'andalousite (Hunan, Chine)



Les blasons à sept et à neuf macles de la maison de Rohan

Origine des macles des armes de la maison de Rohan

La poule ou l'œuf?

Donc en 1751 Gautron de Robien pensait que le nom des pierres de macles venait de leur ressemblance de forme avec la macle utilisée dans la science des blasons (l'héraldique) où elle désigne une figure (un meuble dans le langage de l'héraldique) qui a la forme d'un losange évidé.

Par ailleurs il apparaît à l'époque de Charlemagne les broignes qui furent utilisées jusqu'au début du XIVe siècle, voire à la fin du XVe siècle en Hainaut. La broigne (brogne ou brunie en français du Haut Moyen Âge, bronie dans la Chanson de Roland vers 1080) est une défense corporelle protégeant le thorax qui est constituée d'un vêtement sur lequel sont fixés des renforts rigides appelés mailles ou macles. Par analogie avec certains motifs des broignes ou des cottes à arme du chevalier, la pièce héraldique en forme de losange évidé est appelée macle .



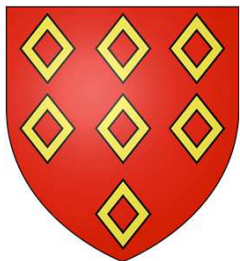
Origine des macles des armes de la maison de Rohan

La poule ou l'œuf?

Le [château des Salles de Rohan](#) situé dans la forêt de Quénécan [édifié](#) initialement sur les ruines d'une motte féodale par un vicomte de Rohan, Alain Ier de Rohan, [en 1128](#), est reconstruit à la fin du XIVe siècle par Alain VIII de Rohan. Le terme « Salles » vient de l'ancien français et désigne un logis.

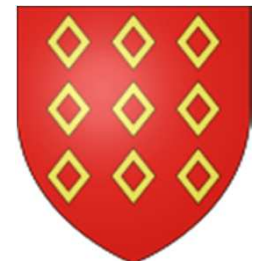
Or il se trouve que [de grands cristaux d'andalousite](#) à faciès chialstolite [se sont développés](#) dans des schistes sédimentaires ordoviciens grâce à un important métamorphisme de contact provoqué par l'intrusion du granite de Rostrenen daté à environ 320 - 310Ma [à proximité de l'étang des Salles de Rohan](#).

[Ces pierres sont abondantes aux Salles de Rohan](#), à tel point que les vicomtes de Rohan, frappés par leur beauté et la [similitude avec la macle héraldique](#), placèrent sept macles d'or sur leur blason; leurs descendants en ajoutèrent deux supplémentaires à partir du milieu du XVIe siècle.



adoptées par Geoffroy de Rohan entre 1216 et 1222

adoptées par Henri Ier de Rohan entre 1552 et 1575



Origine des macles des armes de la maison de Rohan

La poule ou l'œuf?

broignes

mailles ou macles

la macle héraldique

Cristaux de staurolite

cristaux d'andalousite

pierres de macles



Andalousite
Pierre de macle

La macle cristalline

C'est Jean-Baptiste Romé de l'Isle qui donne les premières définitions des macles à la fin du 18^{ème} siècle.



Staurolite

Dans l'introduction de sa Cristallographie, Jean-Baptiste Romé de l'Isle écrit :

« Je démontre, par la concordance des angles, qu'une telle forme est l'inverse d'une autre, qu'un tel cristal est du nombre de ceux que j'appelle **Macles**, c'est-à-dire qu'il est produit par l'inversion en sens contraire de l'une des moitiés de ce même cristal ».

Il reprend les observations de Gautron de Robien et distingue les deux sortes de pierres de croix.

« L'une formée par deux prismes hexagones qui se croisent, soit à angles obliques, soit à angles droits (staurolite); l'autre (andalousite) qui ne doit ce nom qu'à la rencontre plus ou moins régulière de certaines lignes colorées sur les deux extrémités d'un prisme rhomboïdal. Je laisserai à la première le nom de croix et je décrirai la seconde sous celui de macle, quoique ce dernier nom puisse également convenir, non seulement à la première, mais encore à un petit groupe solitaire de deux cristaux, ou de deux moitiés retournées d'un même cristal, quelle que soit d'ailleurs sa nature, pourvu qu'il présente une figure régulière quelconque, avec un ou plusieurs angles rentrants ».

Ces différents résultats reposent beaucoup, pour certains d'entre eux, sur une étude précise avec des mesures angulaires des macles du gypse « fer de lance ».

Macle du gypse fer de lance (Montmartre, Paris)



Après Jean-Baptiste Romé de l'Isle de nombreux savants vont travailler sur les macles. En premier René-Just Haüy, farouche adversaire du précédent, ne reprend pas le terme de macle, il s'intéresse aux « groupements de cristaux » et cherche des relations qui lui paraissent remarquables et ne rien devoir au hasard. Il distingue plusieurs cas qui pour la plupart sont des macles. Il nomme le premier cas « hémitropie » qui correspond aux deux moitiés retournées de Romé de l'Isle, le deuxième « cristaux transposés » (rotation de 60°) et le troisième « groupement cristallin » qu'on appellera plus tard macle par pénétration.

A la suite des premières observations et de différentes contributions on aboutit à la théorie morphologique des macles à la fin du XIXème siècle avec une domination de l'école Allemande. Cette théorie a pour mission de cataloguer les macles existantes et de les classer, mais pas de chercher les causes de leur existence.

Durant le XIXème siècle les cristallographes Français s'engagent dans une voie différente en utilisant les macles pour justifier des hypothèses théoriques et/ou en cherchant à établir a priori quelles sont les conditions favorables à l'apparition des macles.

Bravais joue un rôle important en expliquant le phénomène de mériédrie (héliédrie, tétartoédrie, ogdoédrie) par le fait que le motif peut avoir une symétrie moindre que le réseau.

Mallard reprend la théorie de Bravais car de nombreuses macles ne pouvaient pas être décrites comme des macles par [mériédrie](#). Il introduit la notion de [pseudo-symétrie](#) qui permet d'obtenir un cristal de plus grande symétrie moyennant de « [petits changements](#) » dans les paramètres cristallins. Ce concept n'est si simple car il ne définit pas les tolérances pour les « petits changements ». Cela donne [la loi de Mallard](#) qui définit les macles nommées actuellement « [macles par pseudo-mériédrie](#) ».

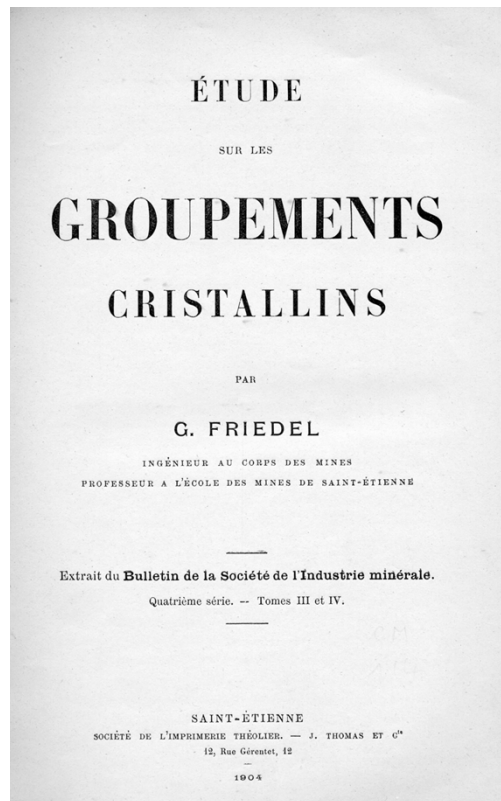
Le problème est que Mallard finira par faire de grands « petits changements » .

Wallerant poursuivra dans cette voie et proposera plusieurs théories qui malgré quelques bonnes idées ne passeront pas à la postérité.

A la fin du XIXème siècle les théories sur les structures cristallines s'accumulent mais aucune ne s'impose faute d'arguments décisifs. L'hypothèse de réseau n'est pas encore bien acceptée à l'étranger et en France elle devient moins claire avec des complications qui n'améliorent pas vraiment les théories.

Georges Friedel, élève de Mallard, est un partisan intransigeant de la théorie réticulaire et il met en place une théorie proche des vues de Bravais.

[Quant aux macles](#), il faut attendre [1904](#) pour qu'une avancée majeure soit faite avec la parution d'un [article de Georges Friedel](#), et quel article!! Il fait [485 pages](#) et est édité dans un livre avec très peu d'illustrations.



Georges Friedel est tout à fait conscient des difficultés dans lesquelles les dernières théories des macles ont plongé la cristallographie et il commence son article par de nombreuses attaques (130 pages!) contre ses prédécesseurs en particulier Mallard et surtout Wallerant.

« ...je montrerai... comment Mallard, qui cependant avait été mis sur la voie par l'étude du polymorphisme, a été arrêté uniquement, au milieu de son explication des macles, par l'introduction en quelque sorte inconsciente et involontaire d'une hypothèse inutile, impliquée dans un terme insuffisamment défini, celui de « molécule cristallographique »;

comment, en reprenant, sciemment cette fois, ce que l'hypothèse implicite de Mallard a de plus injustifiable, en lui ajoutant une série d'autres hypothèses de plus en plus étranges et de termes de moins en moins définis, et en aggravant ainsi à plaisir cette regrettable confusion de mots, M. Wallerant a poussé la théorie des milieux cristallins dans une impasse; impasse où ne peut qu'aboutir une théorie physique qui prétend, partant de rien et sans spécifier aucune hypothèse, expliquer tout. »



Georges Friedel

LES MACLES

La définition que donne **G. Friedel en 1904**, “Une macle est un édifice cristallin hétérogène formé de l’association de deux ou plusieurs cristaux homogènes de même nature orientés suivant des lois déterminées” est assez subjective mais il apporte des précisions importantes :

“ Il faut avant tout préciser ce que nous entendons par lois déterminées, et d’où est sortie cette notion. On sait que **des cristaux contigus formés simultanément ou à des époques différentes** peuvent s’accoler sans que ni la surface d’accolement ni l’orientation relative des individus cristallins homogènes ne paraissent régies par une loi géométrique. Il va de soi qu’en examinant un certain nombre de ces groupements, on peut en trouver qui présentent, au point de vue de l’orientation ou de la surface d’accolement, **des particularités pouvant s’exprimer par une relation géométrique simple plus ou moins exactement vérifiée**. De telles relations n’ont d’intérêt que si **elles se présentent fréquemment et toujours les mêmes sur un grand nombre d’échantillons**. Il y a donc, à la base de toutes les autres notions physiques, une question de probabilité”.

Il ajoute : “**Si la relation géométrique simple**, quelle qu’elle soit, que l’on trouve entre les positions de deux cristaux associés de même nature **était rigoureusement vérifiée, la question de probabilité ne se poserait pas**, car la probabilité est nulle que deux cristaux accolés au hasard prennent exactement telle disposition déterminée. Un échantillon serait aussi intéressant que mille semblables”.

Tout au long du XX ème siècle des définitions vont se succéder et même encore récemment avec la définition de Hahn et Klapper en 2003 et celle de Grimmer et Nespolo en 2006.

LES MACLES

La description des macles n'est pas unique.

Nous allons voir différentes approches qui reposent soit sur des notions de géométrie qui conduisent à la théorie morphologique héritée de l'école Allemande soit sur des considérations cristallographiques qui conduisent à la théorie réticulaire de Friedel.

Dans la théorie de Friedel la macle n'est plus un problème de géométrie, mais un problème de cristallographie.

Il y a également d'autres approches des macles comme la classification de Buerger qui se compose des familles suivantes :

- Les macles de croissance ou primaires
- Les macles mécaniques
- Les macles de transition

Ces deux dernières familles sont regroupées dans l'ensemble des macles secondaires ou de seconde génération.

LES MACLES

La théorie morphologique

La théorie morphologique

Elle a pour objet la description des caractéristiques géométriques rencontrées dans les macles, elle comprend deux termes. Le premier décrit l'orientation des cristaux entre eux : **la loi de macle**, le second décrit la relation spatiale qui unit les deux individus cristallins : **le mode de jonction**.

La loi de macle est définie par les opérations de symétries qui décrivent la symétrie des individus maclés entre eux. Il peut en effet apparaître une ou plusieurs opérations de symétrie pour décrire une macle, lorsqu'il y en a plusieurs on en choisit habituellement une et pour cela il n'y a pas véritablement de règle stricte ce qui conduit à des variantes.

L'opération unique ou l'opération choisie est appelée "**opération de macle**" et l'élément de symétrie associé "**élément de macle**", c'est lui qui est en général utilisé pour décrire la macle. Bien évidemment l'opération de macle ne peut pas être une opération de symétrie du cristal, on ne pourra pas, par exemple, avoir comme élément de macle un axe binaire parallèle à un axe 4 ou 6 du cristal, par contre parallèle à un axe 3 du cristal peut tout à fait se présenter.

LES MACLES

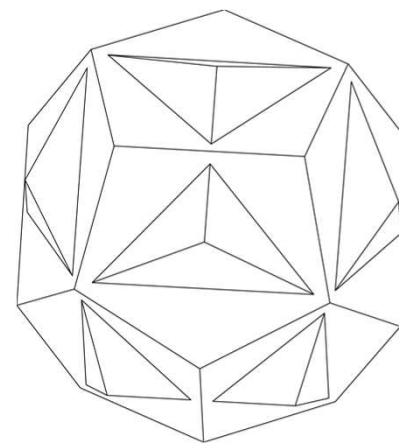
La théorie morphologique

La loi de macle

Plusieurs écoles s'affrontent encore aujourd'hui pour savoir si on doit restreindre les éléments de macle à des éléments de symétrie d'ordre deux ou non. Cependant l'évolution actuelle, inaugurée par l'école Française (Bravais, Friedel...) prend de plus en plus en compte les opérations ponctuelles d'ordre supérieur à deux (Bloss 1994, Nespolo 2005, Grimmer et Nespolo 2006).



Ces éléments apparaissent de façon incontestable dans des macles communes : macle croix de fer de la pyrite ou la macle du spinelle.



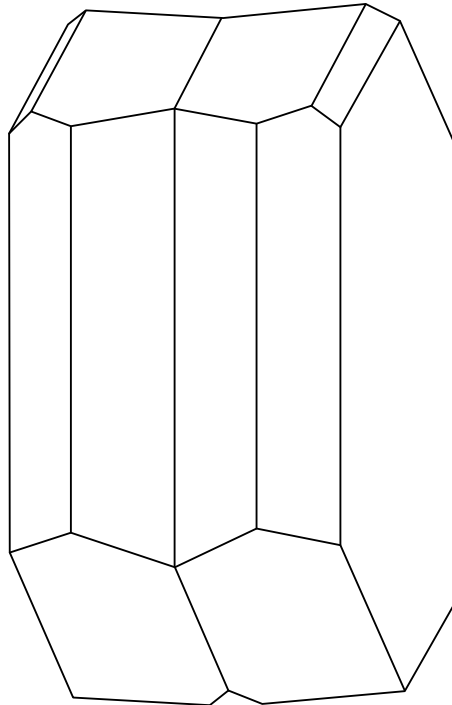
LES MACLES

La théorie morphologique

Dans cette théorie on peut classer les macles selon la loi de macle.

Selon cette loi on parlera de macles par réflexion, de macles par rotation ou axiales et de macles centrosymétriques associées respectivement à des plans de macle, des axes de macle et des centres de macle.

Dans les macles par réflexion le plan de symétrie est toujours parallèle à un plan (hkl) du réseau cristallin, autrement dit une face existante ou possible du cristal.

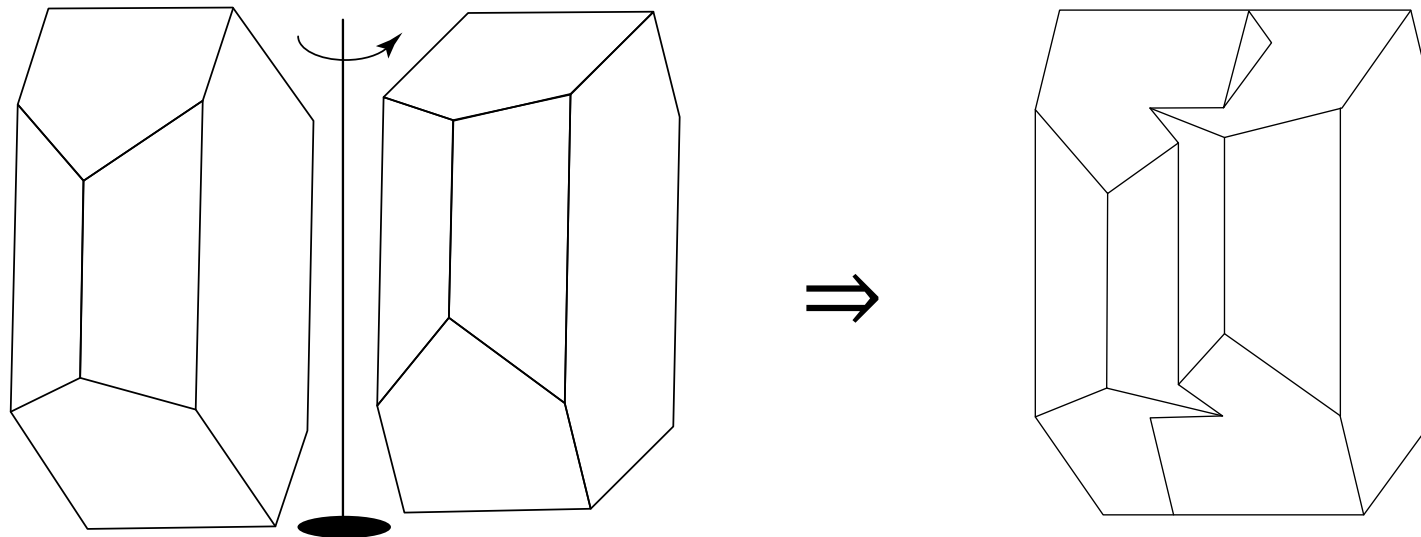


Macle par réflexion : macle de l'albite selon le plan (010)

LES MACLES

La théorie morphologique

On définit les macles axiales (par rotation) par la direction de l'axe de rotation et par l'angle de rotation. Lorsque l'axe de macle est parallèle à une rangée commune aux deux cristaux $[uvw]$, la loi de macle est noté $[uvw]_{\alpha}$, α indiquant l'angle de rotation. Lorsque l'axe binaire de macle est perpendiculaire à une face (hkl) sans être parallèle à une rangée cristalline, il est noté $\perp(hkl)$.



Macle par rotation : exemple de la macle de Carlsbad des feldspaths selon l'axe $[001]$

LES MACLES

La théorie morphologique

Le mode de jonction

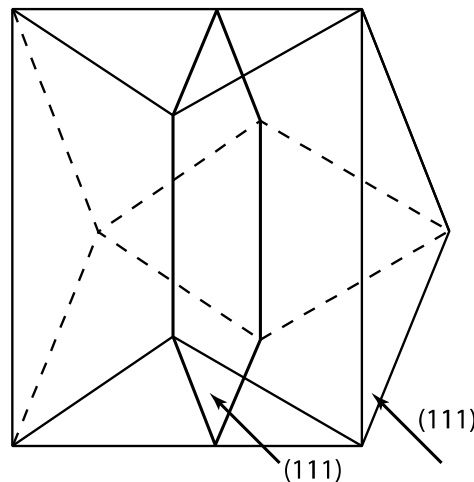
Le mode de jonction des cristaux permet de définir deux grandes familles de macles : les **macles par accolement** et les **macles par pénétration**.

Dans de nombreux cas **la frontière entre les deux cristaux est un plan bien défini**, on parle alors de macle par accolement ou macle par contact et le plan est appelé plan d'accolement ou plan de composition (gypse en fer de lance).

Dans le cas d'un macle par pénétration **la surface de séparation peut être absolument quelconque** ou bien être une combinaison de portions, plus ou moins étendues, de plans d'orientations différentes (Fluorite).

Bien évidemment on observe des cas intermédiaires avec un mélange de parties où un plan d'accolement est dominant et de parties où l'accolement est non planaire.

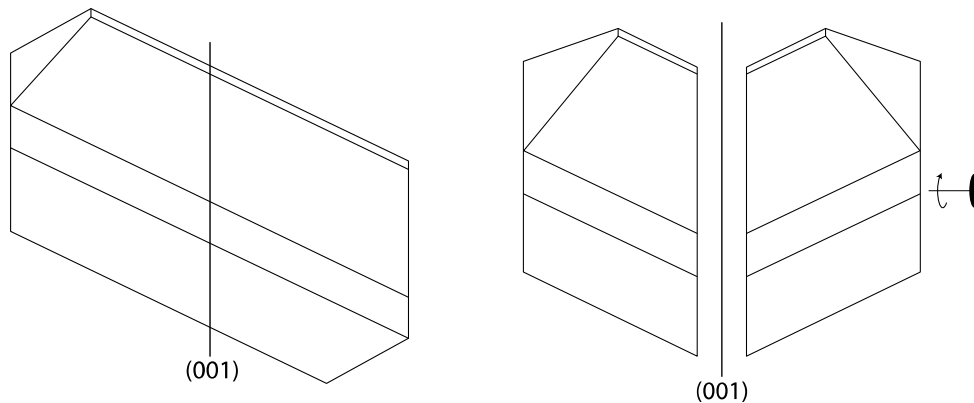
Macle par accolement :
Macle du spinelle selon (111)
Exemple du diamant, la face d'accolement est dans le plan de la photographie



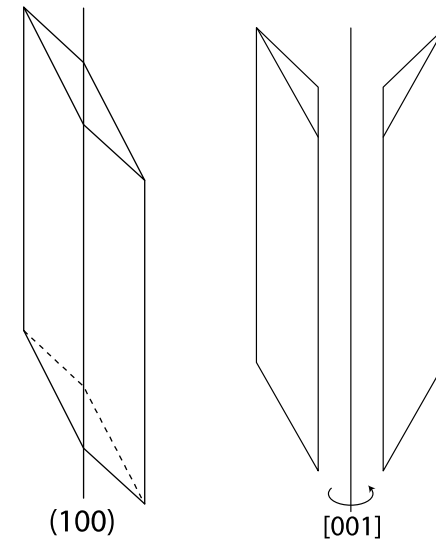
LES MACLES

La théorie morphologique

Dans les macles par accolement on distingue un ensemble particulier : **les macles par rotation-accolement**. L'élément de macle est un axe binaire qui est perpendiculaire au plan d'accolement (**macle normale**) ou parallèle au plan d'accolement (**macle parallèle**). On distingue également les macles complexes qui sont un mélange des deux précédentes et qui mettent en jeu trois individus de macle, on parle de **macle de macle**.



Macle normale de Manebach de l'adulaire
A gauche le cristal avec la trace du plan (001)
A droite les deux individus de la macle



Macle parallèle. A gauche le cristal avec la trace du plan d'accolement, à droite les deux individus de la macle après rotation selon l'axe [001] appartenant au plan d'accolement

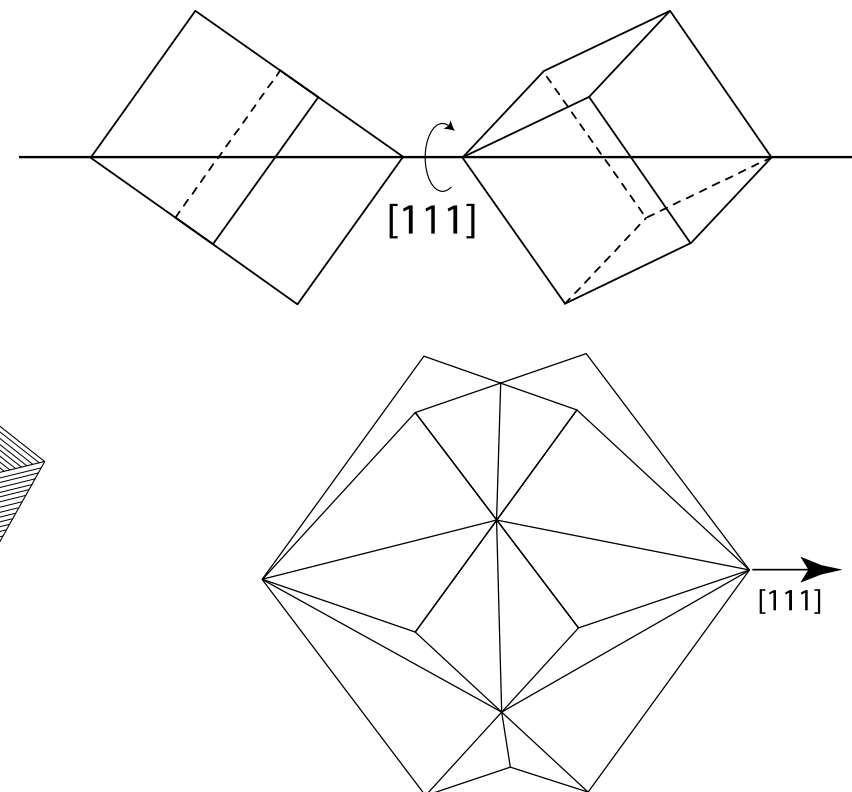
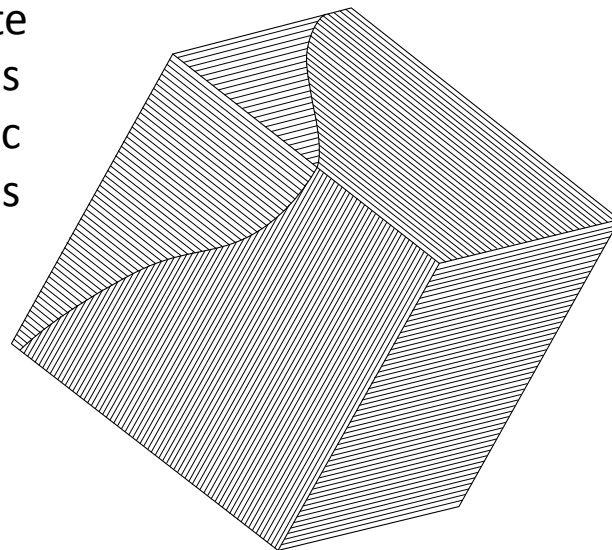
LES MACLES

La théorie morphologique

Lorsque la frontière entre les deux individus d'une macle n'est pas un plan on parle de **macle par pénétration** ou de macle interpénétrée. La **surface de séparation** peut être **absolument quelconque**.

Dans les cas favorables on a un groupement où l'on distingue bien des faces appartenant aux différents cristaux, par contre il est impossible de définir un plan qui les séparerait. C'est le cas de la fluorite où l'on a deux cubes imbriqués.

Parfois la présence de stries d'orientation différentes sur les faces permettent de visualiser plus ou moins bien la frontière entre les cristaux; c'est le cas de la pyrite dite triglyphe qui présente des zones sur les faces du cube avec des stries à 90° les unes des autres.

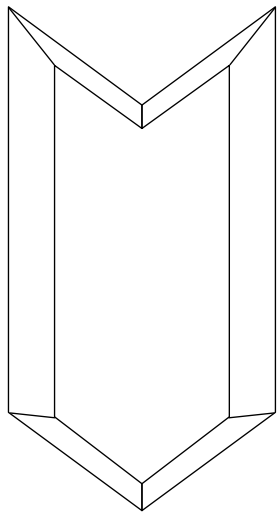


LES MACLES

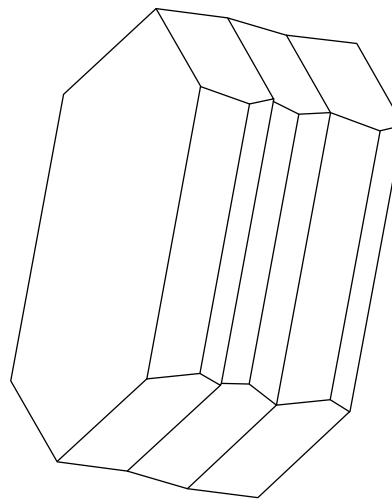
La théorie morphologique

La description d'une macle par son mode d'accolement et la loi de macle n'impliquent pas une seule forme (morphologie) pour le groupement final. Elle dépend du nombre de cristaux impliqués et/ou de la forme de chacun des cristaux. Des termes supplémentaires sont utilisés.

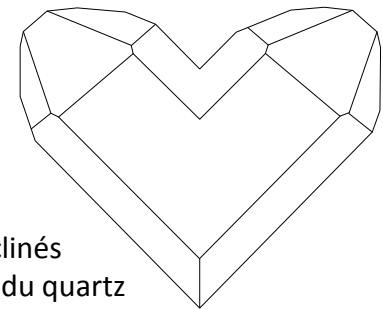
Les **macles à axes inclinés** et les **macles à axes parallèle** : ces termes s'appliquent aux cristaux allongés suivant une direction. Si la macle maintient parallèles les directions d'allongement des individus on parle de macles à axes parallèles et de macles à axes inclinés dans le cas contraire. Les **macles lamellaire** est un cas où la macle binaire se répète selon des plans de composition parallèles.



Macle à axe parallèle
Macle en queue d'aronde du gypse



Macle lamellaire (ou
répétée) d'albite



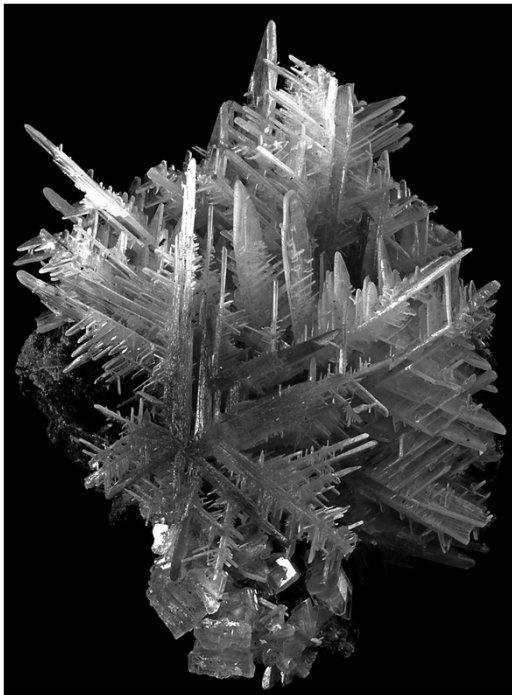
Macle à axes inclinés
Macle du Japon du quartz



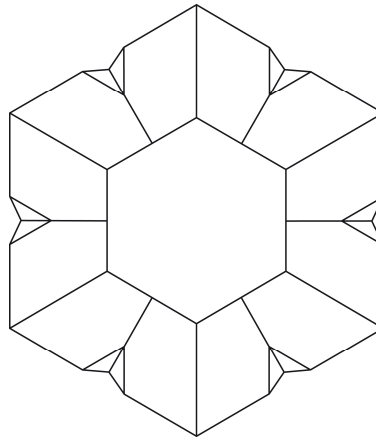
LES MACLES

La théorie morphologique

Ils existent encore d'autres formes de macles comme les macles réticulées et les macles cycliques.



Macle réticulée de Cérusite



Macle cyclique et macle simple du chrysobéryl



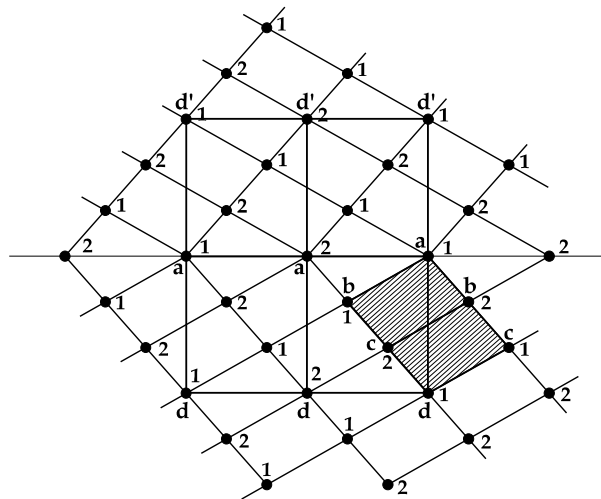
LES MACLES

La théorie de Friedel

Les théories réticulaires

Dans la théorie de Friedel la macle n'est plus un problème de géométrie, elle devient un problème de cristallographie. Cette théorie a permis d'éliminer un grand nombre de fausses macles souvent reconnues à cause de l'ambiguïté de la définition d'une relation géométrique remarquable.

L'idée de base de la théorie de Friedel est qu'il y a dans une macle " un réseau, multiple simple du réseau du cristal homogène, qui se prolonge dans tout l'édifice maculé" qui est un "réseau de macle" R_m ou réseau de coïncidence.



Cependant de nombreuses macles ne peuvent pas être décrites par le prolongement parfait d'un réseau de macle, aussi Friedel admet qu'il puisse subir un petit changement d'orientation le long de la surface séparatrice des parties homogènes de la macle. Ce changement d'orientation est estimé par un angle appelé "obliquité de la macle".

Friedel introduit le concept d'indice de macle qui est le nombre avec lequel il faut multiplier le volume de la maille du cristal de base (réseau R_c) pour obtenir la maille du réseau de macle (R_m).

LES MACLES

La théorie de Friedel

L'indice de macle

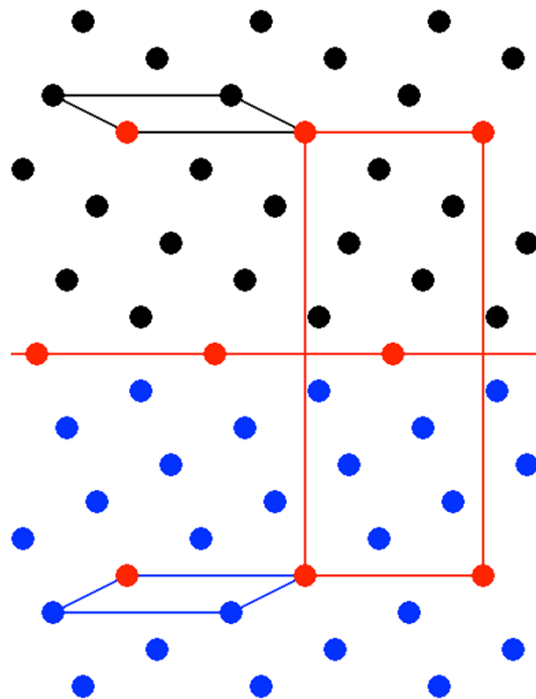
Actuellement le réseau de macle est caractérisé par la fraction $1/\Sigma$ entre le nombre de nœuds de coïncidence et le nombre de nœuds du réseau R_c . Si la valeur de Σ est égale à N on écrit l'indice ΣN . La notation Σ a été introduite par Friedel en 1920.

Friedel a montré que cet indice de macle est faible, 5 est déjà très grand. Cette observation semble justifiée aujourd'hui par des considérations énergétiques.

En effet on peut considérer l'indice de macle comme une estimation du surcroît d'énergie nécessaire à la formation de la macle. Or la probabilité d'apparition d'un défaut, lors de la

croissance d'un cristal, décroît très rapidement avec le surcroît d'énergie qui lui est associé. Donc la probabilité d'apparition d'une macle doit décroître très vite quand l'indice de macle croît.

On admet maintenant que l'indice maximum est inférieur à 6, mais on trouve dans la littérature des valeurs plus élevées qui correspondent à des joints de grains ou à des macles de macle.



Dans cet exemple on a la maille du réseau R_m qui est centrée qui contient 12 nœuds appartenant aux réseaux de la macle, cela donne donc un $\Sigma 6$.

LES MACLES

La théorie de Friedel

L'obliquité de la macle

Soit $[u'v'w']$ la direction exactement perpendiculaire au plan de macle (hkl) , et soit $(h'k'l')$ le plan exactement perpendiculaire à l'axe de macle $[uvw]$. $[u'v'w']$ est parallèle au vecteur du réseau réciproque $[hkl]^*$ et $(h'k'l')$ est parallèle au plan du réseau réciproque $(uvw)^*$. L'angle entre $[uvw]$ et $[u'v'w']$, qui est le même que celui entre (hkl) et $(h'k'l')$, est l'obliquité ω .

$$\text{Donc } \cos \omega = (uh+vk+wl)/(\|uvw\| \times \|hkl\|^*)$$

Le réseau de macle R_m possède une symétrie ou plus exactement un groupe de symétrie ponctuelle différent de celui du réseau R_c de chacun des cristaux.

Tous les éléments de symétrie de R_m qui n'appartiennent pas à R_c sont des éléments de macle possibles. Dans les cas les plus simples chacun de ces éléments décrit les deux cristaux d'une même macle. Dans des cas plus compliqués différents éléments peuvent décrire des macles différentes.

Pour les cas où il n'y a pas prolongement parfait de R_m , Friedel introduit la notion de symétrie approchée ou pseudo-symétrie.

LES MACLES

La théorie de Friedel

A partir de cela il définit quatre familles :

- les macles par mériédrie et pseudo-mériédrie ne prennent en compte que les symétries et pseudo-symétries que l'on trouve lorsque le réseau de macle est confondu (ou proche) avec celui du cristal.
- les macles par mériédrie réticulaire et pseudo-mériédrie réticulaire prennent en compte les symétries et les pseudo-symétries d'un réseau de macle multiple de celui du cristal.

Classification des macles selon les valeurs de l'indice et de l'obliquité

	$n = 1$	$n > 1$
$\omega = 0$	macle par mériédrie	macle par mériédrie réticulaire
$\omega > 0$	macle par pseudo-mériédrie	macle par pseudo-mériédrie réticulaire

LES MACLES

La théorie de Friedel

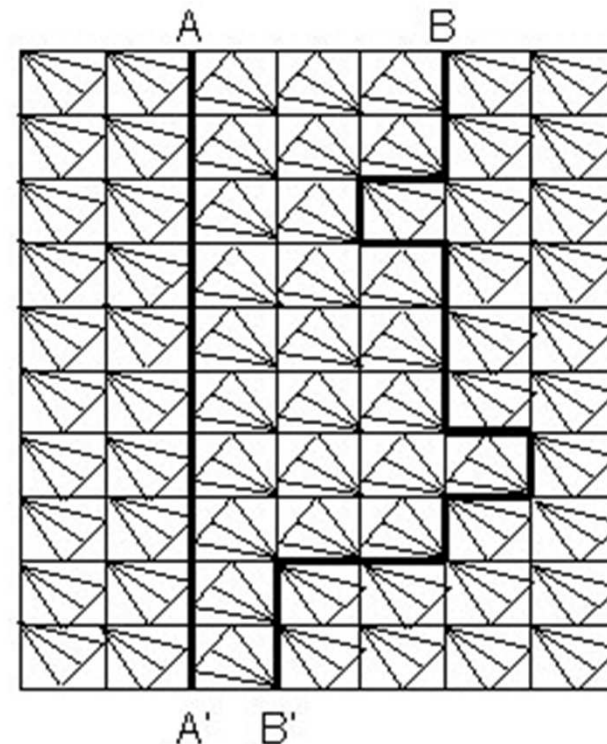
Les macles par mériédrie

La symétrie du cristal combine la symétrie de son réseau et celui de son motif. La symétrie du cristal n'est donc pas nécessairement celle de son réseau, elle peut être moindre. Ce déficit de symétrie est dû au motif. Les cristaux qui ont toutes les symétries du réseau sont appelés **holoèdres**. Les cristaux qui ne sont pas holoèdres sont **mérièdres** : le groupe de symétrie ponctuel d'un cristal mérièdre est un sous-groupe du groupe de symétrie ponctuel de son réseau. Le réseau a la symétrie d'un des sept systèmes cristallins.

Il existe plusieurs degrés de mériédrie. Les cristaux mérièdres ont deux fois (hémiédrie) ou quatre fois (tétartoédrie) ou huit fois (ogdoédrie) moins d'opérations de symétrie que le réseau.

Chacun des sept systèmes cristallins a des hémiédries, les tétartoédries ne se trouvent que dans les systèmes cubique, hexagonal, trigonal et quadratique.

Une exception : l'ogdoédrie avec un groupe ponctuel du système trigonal dans un réseau hexagonal.



LES MACLES

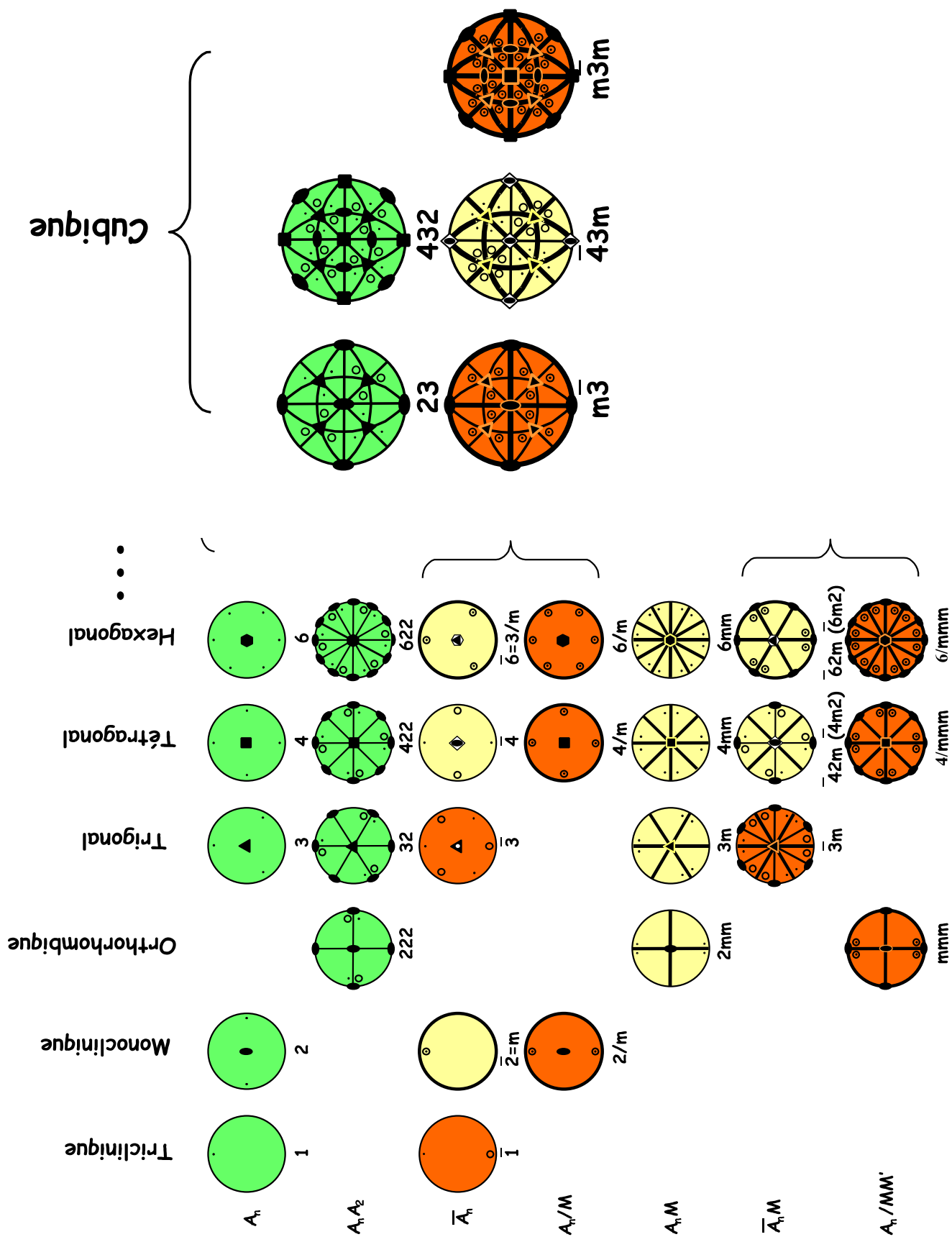
La théorie de Friedel

Cette macle a l'interprétation suivante : si on applique au cristal une opération de symétrie du réseau que ne possède pas le cristal on obtient un cristal qui a exactement le même réseau mais avec une autre position pour le motif. Autrement dit cette macle existe parce que le motif peut prendre plusieurs orientations dans le réseau.

Hémiédrie $\Rightarrow$ deux individus de macle quelque soit l'élément de symétrie de R_m que l'on prend (bien évidemment il ne doit pas être élément de symétrie de R_c).

Tétartoédrie $\Rightarrow$ il peut y avoir des macles différentes selon l'élément choisie, car ce choix mène non pas à l'holoédrie mais à une hémiédrie et il y en a plusieurs pour les systèmes qui possèdent une tétrartoédrie.

La surface d'accolement de la macle par mériédrie peut être quelconque car le réseau est parfaitement continu et à priori elle n'induit pas de déformations, cela devrait donner des macles par pénétration. Cependant, les différentes positions du motif peuvent induire en certains endroits des problèmes de distances interatomiques ce qui entraîne l'existence de plans plus favorables.

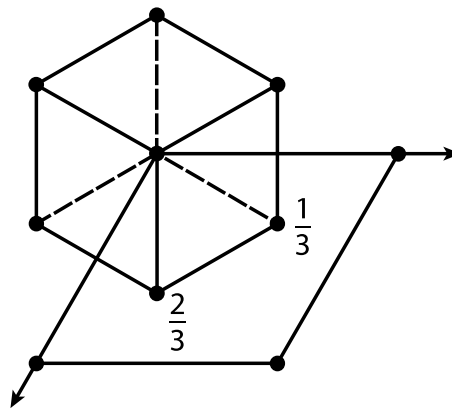
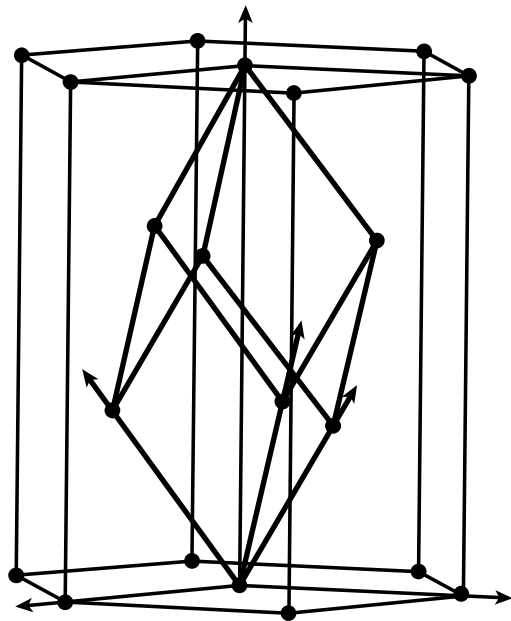


LES MACLES

La théorie de Friedel

Les macles par mériédrie réticulaire

Ces macles reposent sur l'existence d'un réseau de macle R_m multiple de celui du cristal. Comme dans la macle par mériédrie le réseau de macle est parfaitement continu mais il possède des éléments de symétrie que n'a pas le réseau du cristal. Ces éléments de symétrie supplémentaires sont les éléments de macle.



L'exemple type de cette macle est celui du réseau rhomboédrique qui possède un axe ternaire. On peut montrer que ce réseau contient un réseau hexagonal avec une maille triple. Dans ce réseau hexagonal le réseau rhomboédrique a deux orientations possibles d'où la possibilité d'une macle d'indice $\Sigma 3$ décrite par une rotation de 60° .

LES MACLES

La théorie de Friedel

Cette macle apparaît également dans les réseaux cubiques car ils possèdent toujours quatre axes 3. Chacun de ces axes est un axe d'ordre 6 de macle possible. Mais il n'existe pas de système cristallographique avec quatre axes 6, la symétrie associée à la macle est inférieure à la symétrie du réseau cubique. Ceci montre que le groupe de symétrie du cristal n'est pas nécessairement un sous-groupe de celui du réseau multiple.

Les macles par pseudo-symétrie (pseudo-mériédrie et pseudo mériédrie réticulaire)

La macle par pseudo-mériédrie peut apparaître lorsque la symétrie du cristal est très proche d'une symétrie plus élevée. Un exemple important est celui des feldspaths plagioclases qui sont tricliniques mais pseudo-monoclinique parce que deux angles de la maille cristalline sont proches de 90° .

Les macles par pseudo-mériédrie réticulaire ont un réseau de macle multiple qui possède de nouvelles symétries mais qui ne décrit que de façon approchée les positions des deux réseaux de la macle.

Pour déterminer à priori les réseaux multiples de pseudo-symétrie plus élevée, il faut l'existence d'une rangée perpendiculaire à un plan réticulaire, ce plan et/ou cette rangée n'étant pas un élément de symétrie du cristal.

LES MACLES

Il existe également d'autres classifications des macles.

Classifications des macles selon leur genèse (Buerger 1945). Cette classification se subdivise selon les familles suivantes :

Les macles de croissance

Les macles mécaniques

Les macles de transition

Les macles secondaires ou de seconde génération

Sous ce dernier terme on veut montrer que la macle est apparue après la formation du cristal (les macles mécaniques et les macles de transition répondent à cette définition). Il peut être également utilisé pour des croissances en deux épisodes, le second correspondant à la croissance de petits cristaux en position de macle par rapport au cristal qui a poussé pendant le premier.



Macle mécanique de la calcite

LES MACLES

La détermination des structures de molécules complexes laisse un dynamisme sur ce vieux sujet des macles. Cependant ce n'est plus dans le même esprit. En effet, le formidable développement de l'informatique est en train de changer la manière d'appréhender les macles. Les programmes de dépouillement prennent et prendront de plus en plus en compte la présence de défauts cristallins et il n'est plus nécessaire que le scientifique qui les utilise ait une bonne connaissance de ces défauts.

Cette évolution a été mis en relief par Nespolo et Ferraris dans leur compte-rendu du 19^{ème} congrès de l'IUCr : "Le récent congrès de l'IUCr à Genève a montré la redécouverte des macles par les cristallographes moléculaires....Les données sur ces sujets sont rarement accompagnés d'une connaissance cristallographique..... Les macles et les polytypes ont été regroupés au sein d'un microsymposium sous la catégorie, baptisée ironiquement, des "démons". Actuellement les cours de cristallographie fondamentale ne sont que rarement offerts aux futurs cristallographes à l'exception des Universités où une influence minéralogique est présente. Par conséquent, la résolution des structures "démoniaques" est confiée à des logiciels qui ne réclament qu'une petite expérience sur les ordinateurs. L'utilisateur n'est pas entraîné au processus de reconnaissance et de traitement des macles. Ce n'est pas surprenant lorsque l'on regarde le contexte de transformation du cristallographe scientifique vers le technicien pousseur de bouton".

