

La Macle de la Gardette

Dr. Alain ABREAL

Sujet :

Les macles sont souvent très bien décrites macroscopiquement mais sans réelles études à l'échelle atomique qui nous permettraient de définir précisément, et la structure et les relations de cause à effet de ces macles. L'analyse structurale de la macle de la Gardette a permis de montrer qu'il s'agit d'une macle par pseudo mériédrie réticulaire et de présenter une structure atomique de cette macle.

Abstract :

Twin minerals are often very well represented macroscopically but without real studies in the nuclear ladder which would allow us to define precisely, and structure and relations of cause and effect of these twins. The structural analysis of the twin of la Gardette allowed to show that it is about a twin by pseudo reticular meriedry and to introduce a nuclear structure of this twin.

INTRODUCTION

Lorsque je préparais mon exposé et mon site web sur les macles, il m'est apparu que bien que répertoriées dans de nombreux ouvrages, les macles ne sont guère expliquées. Une étude approfondie des informations recueillies sur Internet ainsi que de nombreux dessins réalisés avec le logiciel « faces » de Georges Favreau m'ont permis d'établir une théorie sur la macle du quartz appelée « macle de La Gardette » ou « macle du Japon ».

Je me propose donc après avoir repris une présentation intéressante de la mine de La Gardette de vous présenter cette théorie.

1. LA MINE DE LA GARDETTE

(cf <http://membres.lycos.fr/ericlecaplain2/Cadre7.html-anatase@alpes-net.fr>)

Depuis la découverte d'or en 1700 dans le filon de quartz de la Gardette, près du Bourg-d'Oisans (Isère), le métal jaune a enflammé les imaginations. Malgré l'insuccès des opérations minières entreprises, ce gisement est devenu célèbre par les superbes échantillons de quartz, qui sont présents dans tous les musées du monde.

1.1. Historique

Cette mine célèbre dans le monde des collectionneurs de minéraux est située à environ 2 km du Bourg-d'Oisans, dans le département de l'Isère.

C'est la découverte fortuite par des paysans d'un bloc de quartz contenant de l'or qui, en 1700, enflamme les imaginations. A la suite de cette trouvaille, le duc de Bourbon, grand maître des mines, fait garder les lieux en 1725 sur ordre du roi, des recherches sont entreprises, mais sans grand succès.

En 1767, après la découverte de l'argent des Chalanches, de nouveaux travaux sont décidés et supervisés par l'ingénieur d'origine saxonne Schreiber pour le comte de Provence, propriétaire de la concession minière qui englobe la Gardette et les Chalanches.

De 1781 à 1788, Schreiber constatera le faible intérêt économique de la mine et décidera d'abandonner toutes les recherches. Il écrira à ce sujet, « Les dépenses que ces travaux ont occasionnées ont dépassé de beaucoup la recette faite des matières extraites, cependant, l'administration de Monsieur n'a point ralenti son zèle. Elle n'a point regardé cette mine du côté de l'intérêt, elle l'a considérée comme un objet digne de l'attention d'un grand prince et intéressante pour l'histoire naturelle afin de procurer une parfaite connaissance de la montagne et du filon de la Gardette. C'est un service réel qu'elle a rendu à l'histoire naturelle de la province du Dauphiné. Elle a droit de prétendre à la reconnaissance de tous les naturalistes et amateurs pour avoir enrichi les collections du royaume en autorisant son directeur, à l'imitation de ce qui se passe chez l'empereur et chez l'Électeur de Saxe et dans tous les pays où il y a des mines en exploitation, à céder à des amateurs des échantillons instructifs pour leur valeur intrinsèque ou selon leur beauté pour en verser le produit à la Caisse de la mine » ...

Si ce sage conseil pouvait être entendu, bien des merveilles sur terre seraient sauvegardées. Si la mine de la Gardette n'a pu prétendre à devenir une mine d'or, elle est néanmoins le plus beau gisement du monde pour les cristaux de quartz. D'une limpidité exceptionnelle, ceux-ci présentent des faciès et des groupements rares qui font le bonheur des collectionneurs et des musées.

La mine, quant à elle, fut rapidement délaissée dès 1788.

Néanmoins, le comte de Provence, frère de Louis XVI, propriétaire des concessions fit frapper en 1786 une série de médailles fondues avec l'or de la Gardette.



photo © P. Mathieu

D'autres travaux seront encore entrepris, en particulier lors de la découverte d'or en Afrique du Sud à la fin du XIX^e siècle. En 1805, Napoléon qui veut relancer l'industrie minière, charge Héricart de Thury de lui adresser un rapport sur la Gardette. Celui-ci sera favorable à une reprise de l'exploitation. Mais il faudra attendre 1837 pour que les travaux reprennent. Mais dans les années qui suivirent, l'exploitation changea souvent de propriétaire et chaque fois les quantités d'or extraites ne purent rentabiliser l'entreprise, et entraîneront l'arrêt définitif des recherches en 1901.

En définitive, le filon après 2 siècles de recherches ne produira au total que 20 kg d' Or. Cette faible quantité ne put jamais rentabiliser l'exploitation. Mais entre-temps les spécimens minéralogiques de la Gardette firent le bonheur des premiers cabinets de minéralogie au XIX^{ème} siècle.

1.2. Les minéraux

Le filon de quartz contient aussi quelques sulfures, dont la pyrite et la chalcoppyrite cette dernière prend un développement exceptionnel, ses cristaux pouvant atteindre 20 cm. De plus grandes dimensions ils se présentent en sphénoèdres déformés, associés au quartz et à la malachite.

La brannérite (oxyde d'uranium et de terres rares), minéral rare, est cependant assez abondante en petits cristaux noirâtres, atteignant parfois 2 à 3 mm, associés au quartz et à l'or natif. L'or, toujours visible, apparaît en petites lamelles pouvant exceptionnellement atteindre 4 cm de long. Les cristaux en formes d'octaèdre de 2 à 3 mm peuvent se grouper en dendrites.

Le quartz, dont les cristaux peuvent atteindre jusqu'à 30 cm, est le minéral le plus intéressant de ce gîte exceptionnel. Les macles, fréquentes (macle de la Gardette ou du Japon, où elle fut identifiée), constituent des assemblages de deux cristaux formant entre eux un angle presque droit (84°33).

De nombreuses galeries permettent d'accéder au gisement, dont les puits sont impraticables car les boisages ont disparu. L'entrée en est interdite par un arrêté municipal de 1969, mais il n'est guère respecté et, de temps en temps, des expéditions discrètes découvrent des fissures garnies de magnifiques cristaux.

2. LA MACLE DE LA GARDETTE

2.1. Historique- Localisations

Le premier à avoir décrit la macle de La Gardette est le minéralogiste allemand Weiss en 1829, sur un échantillon trouvé à la Gardette, d'où le nom de cette macle, ainsi que la création des termes de loi de La Gardette ou loi de Weiss, et de la loi {11-22}.

Plusieurs localités ont également fourni en grand nombre des échantillons de grande qualité de cette macle, notamment Otomezaka dans le district de Yamanashi et à Narushima dans le district de Nagasaki, au Japon, d'où la dénomination parfois rencontrée dans la littérature de « macle du Japon ».

De nombreux sites à travers le monde ont depuis fourni des échantillons de cette macle, en Arkansas, dans l'état de New York, en Alaska, au Nouveau Mexique, en Arizona aux Etats Unis, ainsi qu'en Suisse, au Brésil, en Russie...

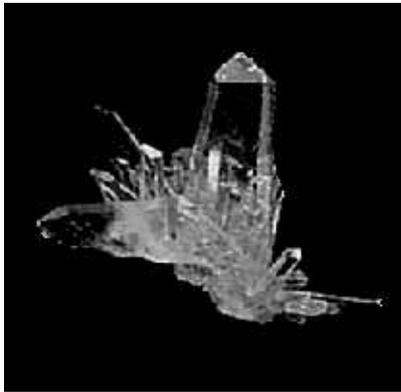
On notera que si cette macle est fréquente dans les sites japonais, elle est beaucoup plus rare dans les sites de l'Arkansas, sans doute pour des raisons de conditions de cristallisation différentes.

Il est à noter également qu'une demi-douzaine de sites de part le monde ont donné des macles de La Gardette multiples, dont ceux de Mayer dans le comté de Gila en Arizona (Etats-Unis), de Brussone, près de Verres (Val d'Aoste, Italie) et la mine de San Pedro près de Golden dans le Nouveau Mexique (Etats-Unis).

On a également rencontré une macle composite Dauphiné-La Gardette. Il est possible que les échantillons en forme de sapin de Noël trouvés à Tirniauz dans les Monts du Caucase, à la frontière entre la Géorgie et la Russie, puisse être une itération cyclique de macles composites de ce type.

2.2. Habitus

Il y a 4 types de macles regroupés sous le nom de « macle de La Gardette ou macle du Japon ». Elles sont toutes des macles de contacts de 2 individus, avec l'axe c incliné d'un angle de $84^{\circ} 33'$. Le plan de contact est dans tous les cas le plan {11-2}. Dans l'un des 4 types de macles, ce plan {11-2} est un plan de macle, et dans les trois autres cas, il s'agit d'un plan de pseudomacle qui décrit seulement la relation angulaire entre les systèmes d'axes cristallographiques des individus.

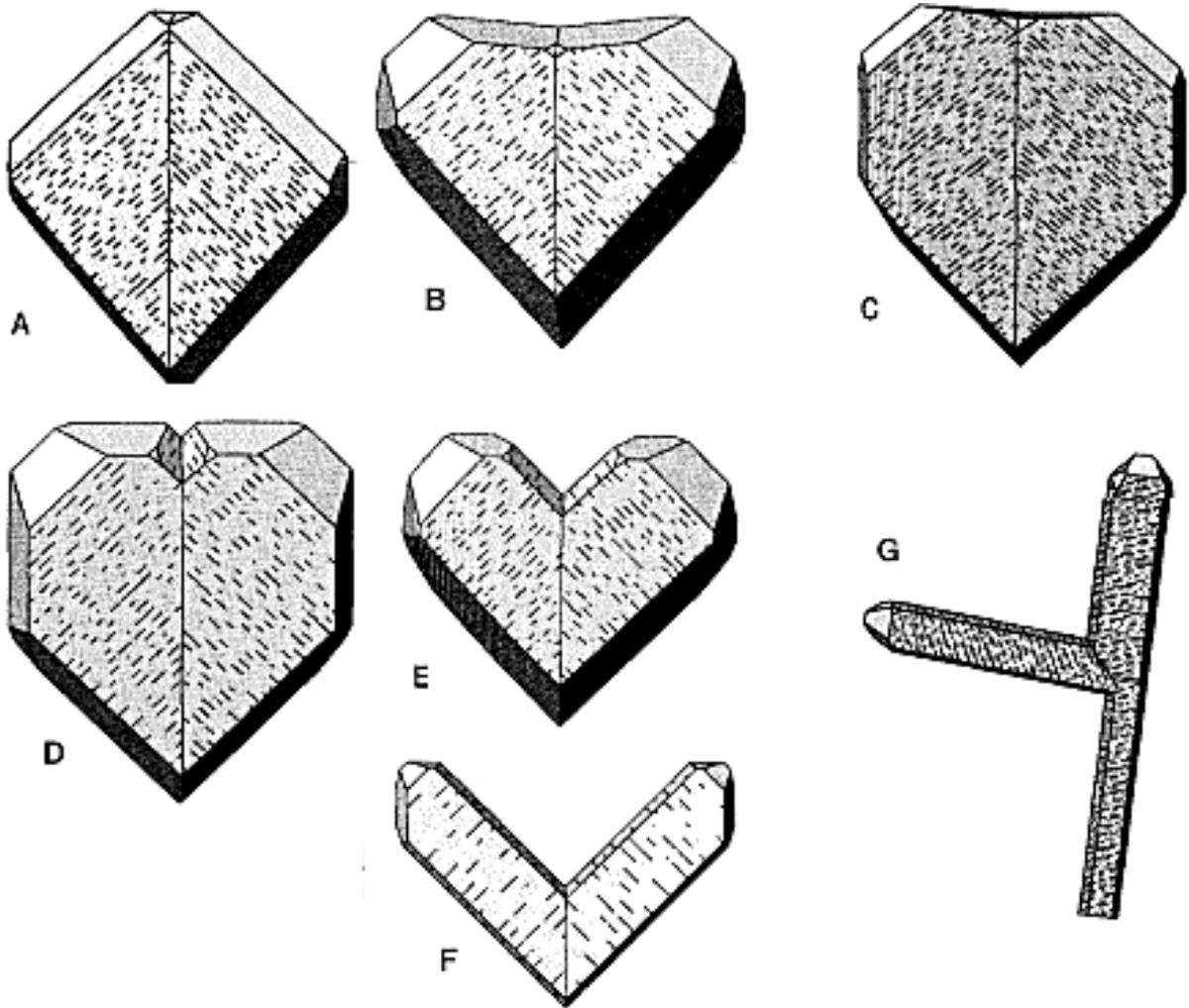


1. (type B) et 2. (type F). Vizille
3. Oisans (type F)
4. Chine (type E)
5. Madagascar (type E)



Il y a en général deux habitus de la macle de du Japon :

- La première est une macle en forme de V composée de deux individus souvent légèrement tabulaires, mais il a parfois été rencontré des macles de La Gardette dont les deux individus forment des prismes bien distincts ; un individu est alors beaucoup plus petit que l'autre élément de la macle. La surface de contact entre les deux individus est relativement petite.
- La seconde est une macle en cœur ou en papillon. Dans ce cas, les deux individus sont tabulaires et la surface de contact est plus importante.



Macles de La Gardette selon J.M. Le Cléac'h



**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**



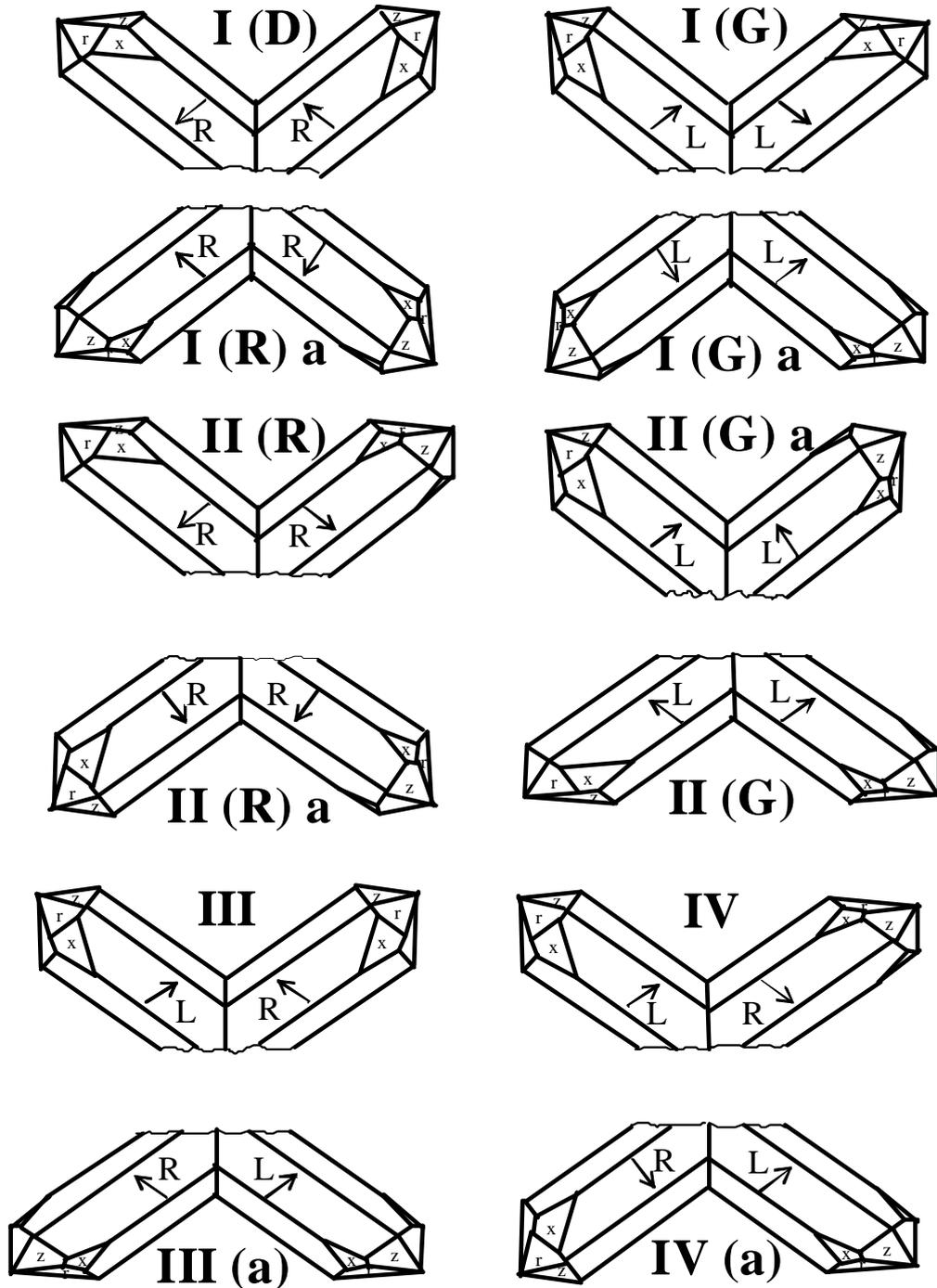
**3 macles du Japon dans un même ensemble: pièce 7cm , Pérou
type de macle E et C-D, type de macle B**

La surface de contact peut montrer soit une ligne bien dessinée soit une ligne en zig zag. Cette ligne de suture est généralement blanche nébuleuse caractéristique de la présence de contraintes internes fortes.

Des observations fines effectuées par Descloizeaux ont mis en évidence, au niveau de la suture entre les deux individus, un léger gauchissement de ceux-ci.

2.3. Pouvoir rotatoire

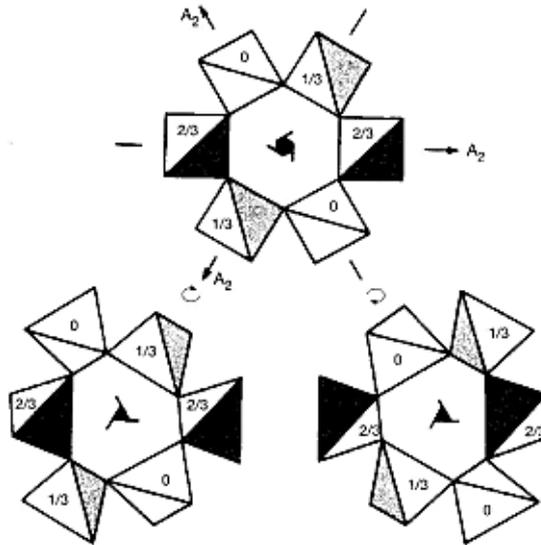
Frondel, en 1962 a décrit les différentes macles possibles en fonction des pouvoirs rotatoires des individus, identiques ou différents, selon si les cristaux sont droits ou gauches.



12 types idéalisés de macles de La gardette en fonction de l'orientation des cristaux (d'après Frondel (1962))

Personnellement, je ne sais pas si ces 12 types « idéalisés » ont été rencontrés, mais je suis plutôt sceptique. En effet, le fait d'imaginer que toutes les orientations sont possibles, voire équivalentes, remet en question le principe même de la macle, à savoir qu'il s'agit d'une seule et unique cristallisation, et non d'une épitaxie, obtenue à partir d'un élément de symétrie, centre, axe ou plan sur lequel sont situés des défauts (impuretés, lacunes...).

Or, la structure du quartz α apparaît lors du refroidissement du quartz β haute température, à 573°C, tout en maintenant l'orientation gauche ou droite du cristal haute température.



Deux orientations prises par les tétraèdres dans un quartz α gauche après rotation de 16° autour des axes binaires, lors du refroidissement à 573°

Il est donc a priori très peu probable de rencontrer des macles dont les deux individus de rotations soit droite, soit gauche soient différentes, puisque la cristallisation parallèle des deux individus, à partir d'une base ou d'un germe commun devrait plutôt former deux individus identiques. J'aurais donc tendance à éliminer les figures III et IV des types idéalisés de Frondel.

Néanmoins, si le mécanisme d'orientation des tétraèdres lors du refroidissement à 573°C ne se produit pas à partir de la base de la macle mais à partir des prismes des individus ou de la surface des cristaux, il se peut alors que les deux orientations puissent exister. Ce serait alors une cause de contraintes internes sur la ligne de suture et l'une des causes possibles du blanchiment souvent observé selon cette ligne. Dans ce cas, les figures II pourraient exister.

Si l'on se réfère au fondement même de la macle, à savoir qu'il ne s'agit pas de deux cristaux accolés mais bel et bien d'un seul cristal formé de deux individus, seules les figures de type I sont probables, figures pour lesquelles les pouvoirs rotatoires soit gauche, soit droit, ainsi que les orientations sont identiques pour les deux individus.

2.4. Origine de la macle

Il est acquis que la macle de la Gardette est due à la présence d'impuretés. Ces impuretés n'ont à ma connaissance jamais été clairement identifiées. Seul un cours de minéralogie indique que les stries présentes sur la macle naturelle sont identiques à celles obtenues artificiellement par action des carbonates alcalins.

Il est en outre connu que les sites où l'on rencontre la macle de La Gardette sont riches en gaz carbonique suite aux analyses de composition effectuées sur les bulles de gaz piégées dans le quartz. Ces macles pourraient donc fort bien être dues à la présence de carbonates ou d'alcalins Li, Na, K, Cs...

Dans la fabrication du verre les alcalins comme le sodium et surtout le potassium sous la forme de soude ou de potasse sont utilisés dans l'industrie verrière comme fondants. A la température de fabrication du verre, le sodium et le potassium sont reliés à des oxygènes sommets des tétraèdres. Or comme les alcalins ne sont que monovalents, ils ne sont liés qu'à un seul oxygène et rompent ainsi les liaisons entre les tétraèdres de SiO_4 . Il y a alors rupture de la chaîne de tétraèdres et diminution des propriétés mécaniques du quartz. La structure est moins rigide et les tétraèdres peuvent pivoter aléatoirement et donner du verre. La présence d'alcalins seraient donc tout à fait un élément privilégiant la rupture des chaînes hélicoïdales de tétraèdres permettant ainsi l'apparition d'une autre orientation.

NOTA

Il est à noter que d'autres plans autre que le {11-2}, peuvent aussi être plans de macle pour des macles par accollement 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° , selon le plan {44-1} avec rotation de $45^\circ 39'$
- macle de Reichensten-Grieserthal, angle de $76^\circ 26'$, selon le plan {10-1} avec rotation de 180°
- 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.

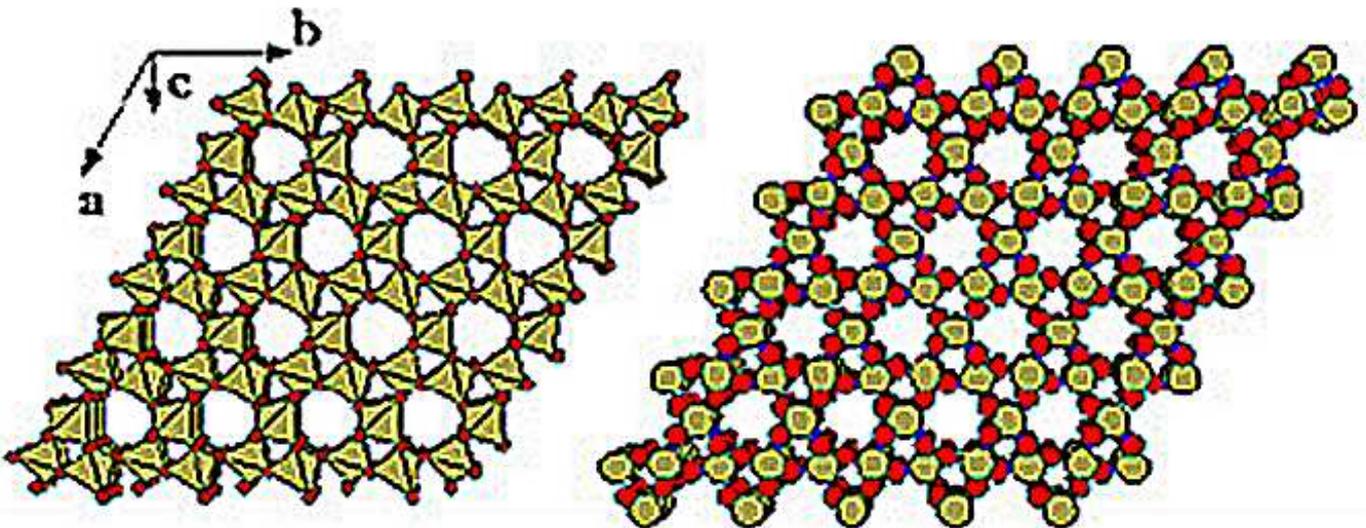
2.5. Structure de la macle

2.5.1. La structure du quartz (<http://www.mnhn.fr/sfmc/docs/hauy98/badro.htm>)

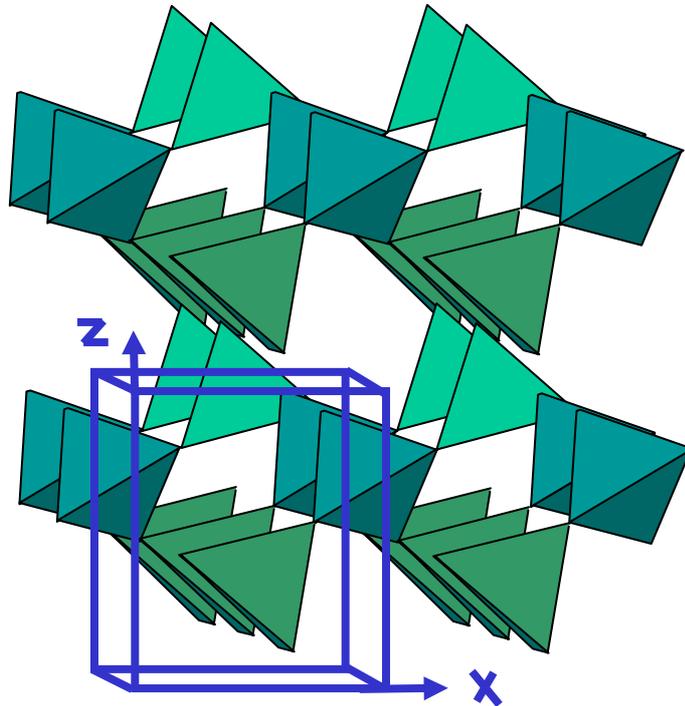
Le quartz est un tectosilicate, il est constitué de spirales de tétraèdres réguliers SiO_4 , reliés par leurs sommets. Le silicium est en coordinence quatre, et chaque oxygène situé aux sommets des tétraèdres est relié à deux siliciums de deux tétraèdres voisins.

La forme stable à température ambiante du quartz a une structure rhomboédrique et de groupe d'espace $P3_121$ pour le quartz α gauche et $P3_221$ pour le quartz α droit.

Les axes a et b sont équivalents. La représentation en polyèdres ci-dessous permet de visualiser les liaisons entre les tétraèdres et la structure en hélice du quartz. L'axe de la spirale est confondu avec l'axe cristallographique c.



Sur internet, il existe un site qui présente de nombreuses structures des minéraux (<http://www.ill.fr/dif/3D-crystals/vrml/quartz.wrl>). Ce site plus qu'intéressant m'a permis de mieux visualiser le positionnement de ces tétraèdres dans l'espace.



2.5.2. Type de macle

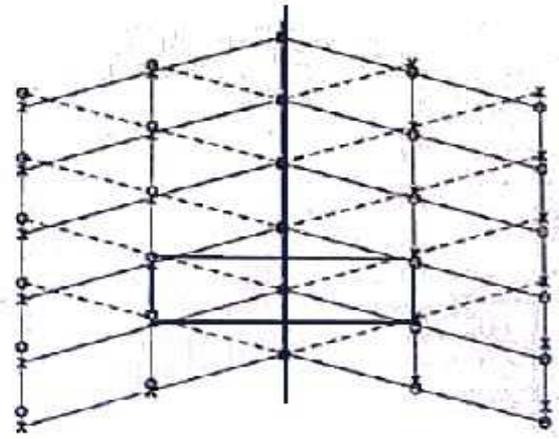
La nature du type de macle de la macle de La Gardette est soumise à controverse, dans la littérature, Jean Michel Le Cléach présente la macle de La Gardette comme étant une macle par pseudo-symétrie. Alors que l'on peut lire dans le Larousse des Minéraux de Henri Jean SCHUBNEL qu'elle est due à la symétrie presque quadratique d'une macle multiple, et qu'il s'agit d'une macle par pseudoméridrie réticulaire, l'un des types de macle le plus général.

Il est à noter que la différence entre ces deux types de macles est très faible et qu'il est donc possible de préférer une hypothèse à l'autre.

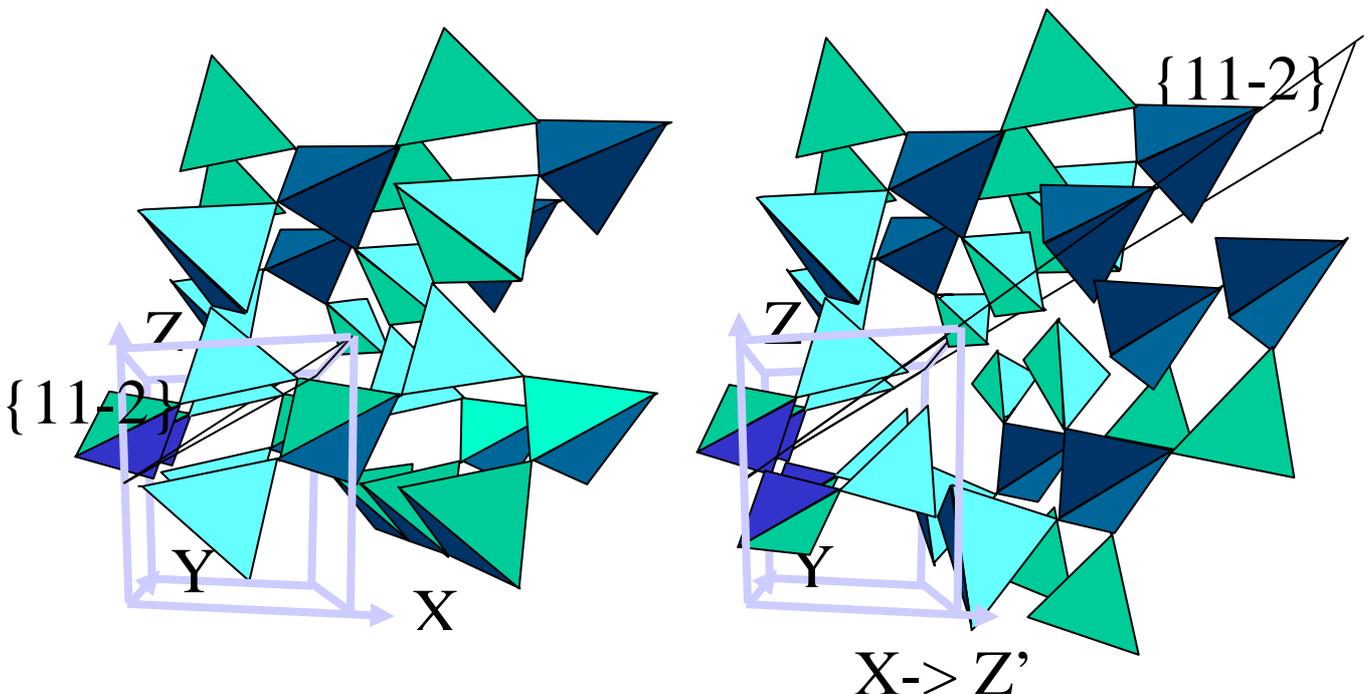
2.5.2.1. Macle par pseudo symétrie

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.

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.



Macle par pseudosymétrie



Structure du quartz

Structure de la macle par symétrie selon {11-2}

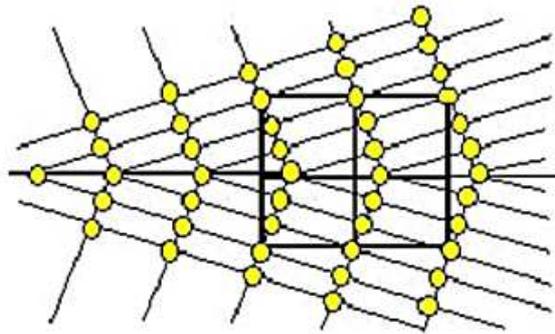
Dans le cas d'un plan de macle, l'angle entre la normale au plan et la rangée pseudo perpendiculaire définira l'obliquité de la macle. La mise en évidence d'une macle reviendra donc à rechercher dans le réseau une rangée suffisamment proche de la normale au plan. Le réseau, simple ou multiple, de l'un 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'accrolement ne peut pas être quelconque ; l'accord entre les deux réseaux ne pouvant se faire que dans le plan d'accrolement : ce sont des macles par contact.

Dans le cas de la macle de La Gardette, cette pseudo symétrie existerait selon le plan {11-2}, plusieurs observations posent problème :

- La première et non pas la moindre est qu'une pseudo symétrie selon ce plan {11-2} ne permet pas d'expliquer l'existence d'un angle régulier de $84^{\circ}34'$ entre les deux individus.
- Ce type de macle ne satisfait pas non plus les relations de degrés de symétrie entre la maille de la macle et celle des individus.
- Lorsque l'on essaie de faire correspondre les tétraèdres par symétrie selon le plan {11-2}, il y a trop de contraintes dues aux déformations des tétraèdres pour permettre la jonction entre les tétraèdres des deux individus. Il faudrait qu'il y ait donc une quantité importante d'impuretés liés aux oxygènes des tétraèdres le long de la ligne de suture, quantité trop importante pour assurer alors la résistance mécanique de la macle.
- la pseudo-symétrie ne peut pas expliquer non plus le gauchissement observé par Descloizeaux le long de la ligne de suture.

Macle par pseudoméridrie réticulaire

Dans le cas de la macle de La Gardette, l'obliquité n'est pas nulle et la multiplicité est plus grande que 1. C'est donc le cas le plus général de la pseudoméridrie réticulaire.



Macle par méridrie réticulaire

La macle par méridrie 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.

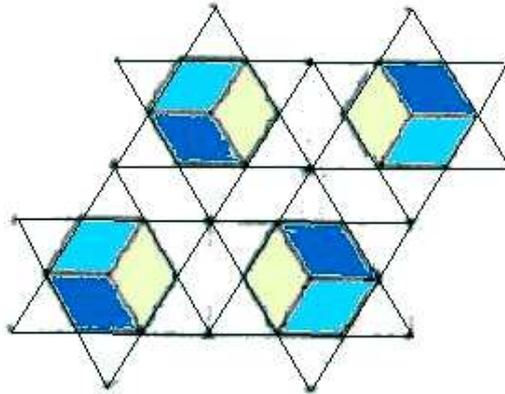
La figure ci-dessus présente un plan de macle ainsi que la maille élémentaire de la macle. Ici l'indice de macle est 3.

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.

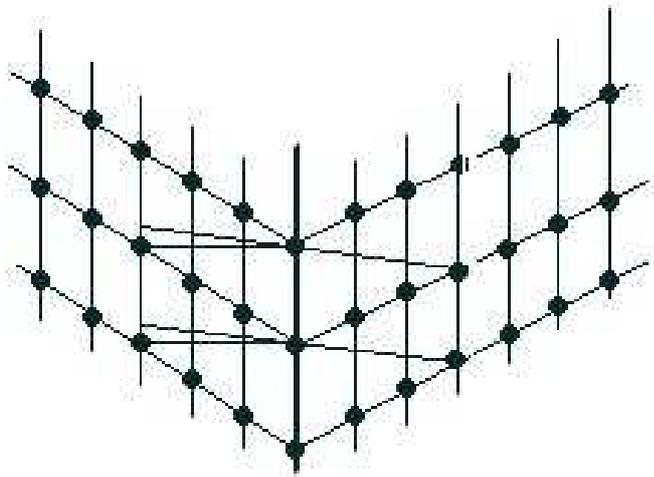
Ce type de macle ne peut exister (par multiplicité du réseau) que s'il existe une rangée perpendiculaire à l'axe de la macle. Ce qui fait que ce type ne peut exister que pour les systèmes à axe principal ($A_n^+ > 2$) lorsque l'élément de macle est parallèle ou perpendiculaire à cet axe.

En pratique, on ne rencontre des macles par méridrie réticulaire que pour des systèmes possédant une symétrie ternaire (rhomboédrique et cubique), conduisant à un réseau multiple hexagonal par rotation de 60° autour de cet axe, qui devient alors un axe de rotation d'ordre 6.

Dans le système rhomboédrique, 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 méridrie, puisque localement, sans changer la structure globale de la macle, il y a apparition de mailles d'orientations différentes.



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

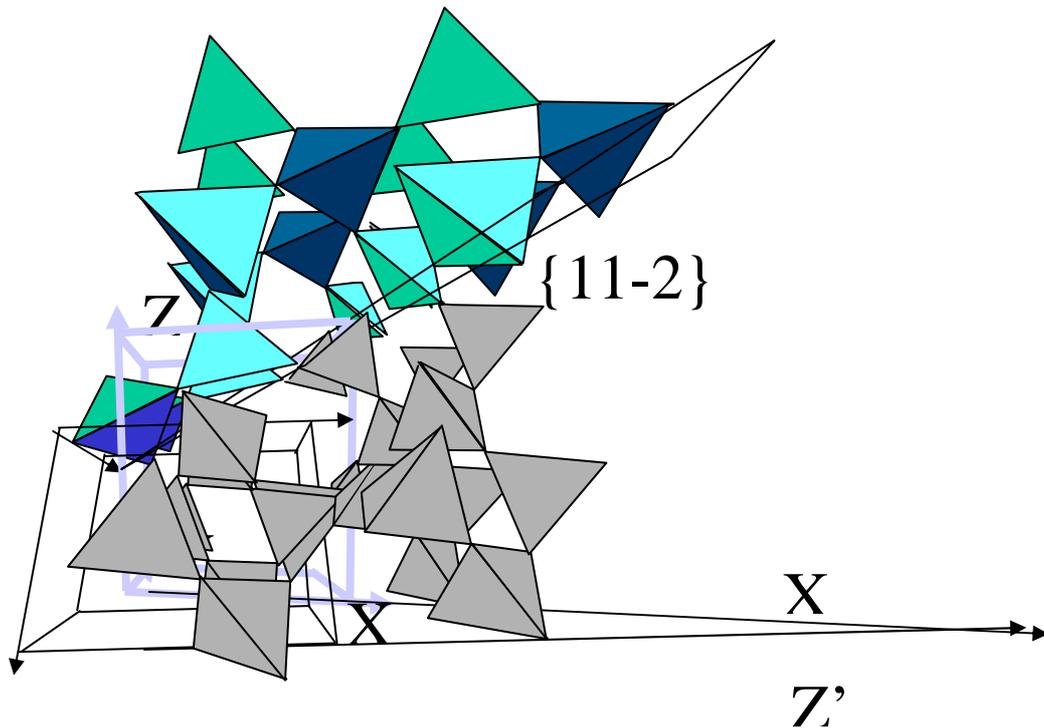


Macle par pseudomériédrie réticulaire (pyroxènes monocliniques)

Le principe en est schématisé ci-dessous, 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.

Dans le cas qui nous préoccupe, puisque la maille multiple n'a qu'une symétrie approchée, les coïncidences de positions atomiques sont moins nombreuses : on l'appelle alors macle par pseudo mériédrie réticulaire.

Pour le quartz, les caractéristiques de la maille sont assez proches ($a=4,9124 \text{ \AA}$ et $c=5,403 \text{ \AA}$ à 25°C). On peut ainsi construire la macle par jonction selon le plan $\{11-2\}$ de deux mailles d'orientations différentes.



La correspondance entre les deux individus est plus forte que dans le cas d'une symétrie, et l'on peut ainsi expliquer l'existence de l'angle de $5^{\circ}26'$ entre les axes a et c' du deuxième individu de la macle qui conduit à l'angle de $84^{\circ}34'$ caractéristique de la macle de La Gardette.

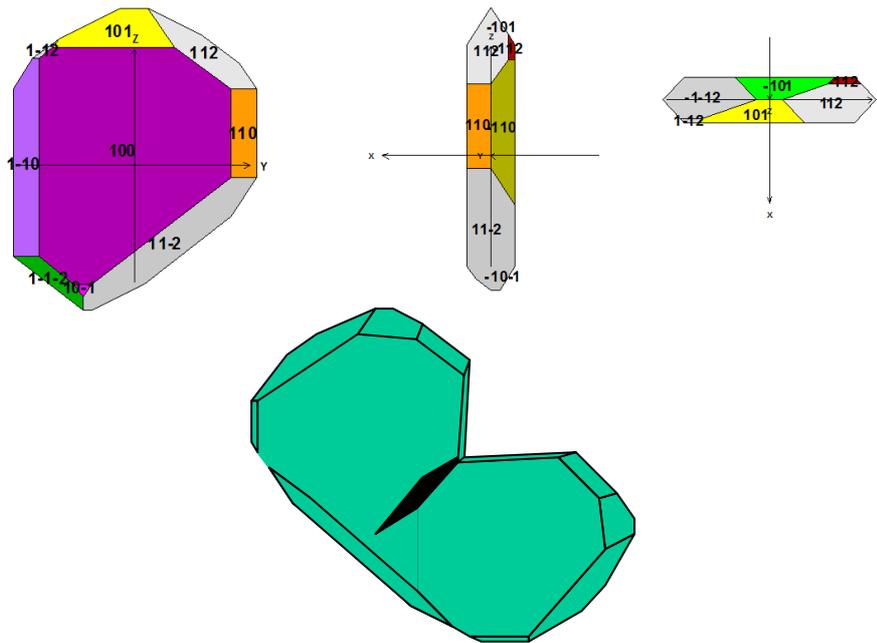
Il semble donc que la macle de La Gardette soit bel et bien une macle par pseudoméridie réticulaire due aux faibles différences de paramètres de maille.

2.5.3. Cristaux tabulaires

L'observation des macles de La Gardette montre que la plupart des individus comportant cette macle sont tabulaires. Mais est ce que c'est une cause ou une conséquence de la macle ?

Il existe naturellement des cristaux de quartz tabulaires qui pourraient être plus sensibles que les cristaux allongés à la formation de macle.



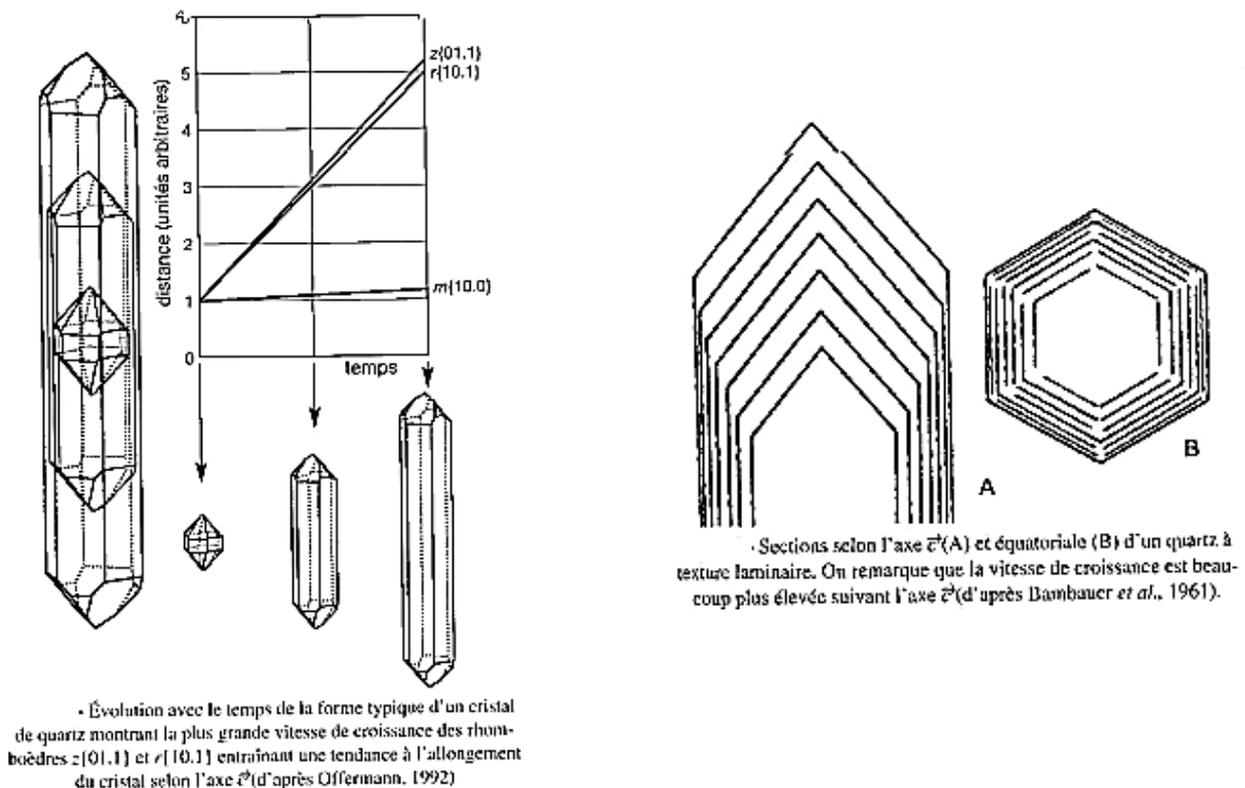


Jonction de deux cristaux tabulaires

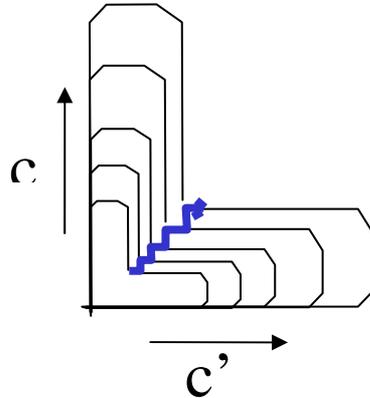
Toutefois, dans les échantillons de La Gardette, les macles bien que fréquentes sont souvent entourées de cristaux prismatiques allongés.

Si l'on se réfère à nouveau à la structure du quartz, on observe que la structure est de forme hélicoïdale selon les axes cristallographiques a et c, les axes a et b étant équivalents.

De plus, si l'on reprend les études cinématiques effectuées sur la croissance des cristaux de quartz, on voit combien la vitesse de cristallisation est plus importante pour les rhomboèdres que pour les prismes, conduisant les cristaux à s'allonger



La croissance la macle de La Gardette s'effectue donc principalement, en parallèle, selon les axes c et c' de la macle, comme une croissance normale des deux individus isolés. Le contact entre ces deux individus fait en sorte que la croissance ou plutôt la pseudo-croissance selon les axes a et a' n'est qu'une résultante de la croissance selon c' et c respectivement de l'autre individu au niveau de la ligne de suture.



L'aspect tabulaire des individus de la macle de La Gardette n'est donc pas la cause de l'existence de la macle, mais l'une de ces conséquences.

CONCLUSION

Dans le style ce n'est pas, c'est...cet exposé sur la macle de La Gardette est excellent. On voit une nouvelle fois que les premiers minéralogistes ont su parfaitement identifier macroscopiquement la morphologie des cristaux et des macles. Mais dès que l'on change d'échelle, non seulement les études sont plus rares, mais elles sont surtout plus de nature sensitive que scientifique : On pense que plutôt que on sait que parce que.

C'est pourquoi les macles sont toujours non seulement des pièces très intéressantes visuellement mais aussi un sujet d'étude passionnant pour qui veut se masturber l'esprit.