Zeitschrift: Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Herausgeber: Société Vaudoise des Sciences Naturelles
Band: 98 (2019)

Artikel: La morphologie des cristaux de calcite du Jura vaudois
Autor: Andermatt, Paul J. / Richards, R. Peter / Meisser, Nicolas
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-846635

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

La morphologie des cristaux de calcite du Jura vaudois

Paul J. ANDERMATT[1*], R. Peter RICHARDS[2] & Nicolas MEISSER[3]

Andermatt P. J., Richards R. P. & Meisser N., 2019. La morphologie des cristaux de calcite du Jura vaudois. *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles* 98: 5-34.

Résumé

La calcite est le minéral ubiquiste constituant les roches sédimentaires du Jura vaudois, comme le calcaire et les marnes. Sporadiquement, on observe des cristaux de ce carbonate de calcium tapissant les cavités au sein de ces roches. Réalisée depuis plus de 20 ans, leur étude morphologique illustre la complexité des formes cristallines de la calcite. Des sites comme les carrières de La Sarraz ou d'Éclépens se singularisent même à l'échelle mondiale par la qualité esthétique des cristaux récoltés et leur diversité morphologique liée à des conditions tectoniques, thermiques et chimiques particulières.

***Mots-clés*:** calcite, calcium, carbonate, cristaux, formes cristallines, La Sarraz, Éclépens, Crétacé, Jura, Vaud.

Andermatt P. J., Richards R. P. & Meisser N., 2019. The morphology of calcite crystals from the Jura mountains, Canton of Vaud. *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles* 98: 5-34.

Abstract

Calcite is the ubiquitous mineral that constitutes the sedimentary rocks of the Jura Mountains of the Canton Vaud, such as limestone and marl. Well-formed crystals of this calcium carbonate mineral may sometimes be found lining the cavities within these rocks. Their morphological study over more than twenty years illustrates the complexity of the crystalline forms of calcite. Sites such as the quarries of La Sarraz or Éclépens stand out, even on a global scale, for the aesthetic quality of the crystals, and their diverse morphology, which is a result of the particular tectonic, thermal and chemical conditions in which they grew.

***Keywords*:** calcite, calcium, carbonate, crystals, crystal shapes, La Sarraz, Éclépens, Cretaceous, Jura, Vaud.

Andermatt P. J., Richards R. P. & Meisser N., 2019. Die Morphologie der Calcitkristalle im Waadtländer Jura. *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles* 98: 5-34.

Zusammenfassung

Calcit ist das allgegenwärtige Mineral, das die Sedimentgesteine des Waadtländer Juras bildet, dies zusammen mit Kalkstein und Mergel. Gelegentlich werden Kristalle dieses Calciumcarbonats beobachtet, die die Hohlräume dieser Gesteine auskleiden. Die seit über 20 Jahren durchgeführte morphologische Studie veranschaulicht die Komplexität der kristallinen Formen des Calcits. Fundstellen wie die Steinbrüche von La Sarraz oder Éclépens zeichnen sich sogar weltweit aus durch die Ästhetik der gesammelten Kristalle und ihre morphologische Vielfalt, verbunden mit besonderen tektonischen, thermischen und chemischen Bedingungen.

***Schlüsselwörter*:** Calcit, Calcium, Karbonat, Kristalle, Kristallformen, La Sarraz, Éclépens, Kreide, Jura, Waadt.

[1] Ruelle de la Condémine 5, CH-1321 Arnex-sur-Orbe.

[2] Department of Geology, Oberlin College, Oberlin, Ohio 44074, USA.

[3] Musée cantonal de géologie, Université de Lausanne, Anthropole, quartier de Dorigny, CH-1015 Lausanne.

[*] Correspondance : andermatt.arnex@outlook.com

© Société Vaudoise des Sciences Naturelles, 2019. Tous droits de reproduction réservés. CODEN : BSVAA6 ISSN : 0037-9603

Introduction

La notion d'espèce minérale étant souvent abstraite pour bien des naturalistes, en introduction à cet article il est bon de rappeler sa définition formelle selon l'Association internationale de minéralogie (Nickel 1995) :

Un minéral est un corps simple ou un composé constitué de plusieurs éléments liés et chimiquement bien définis, cristallisé et dont la genèse résulte d'un processus géologique.

Dès lors, les objets extraterrestres (météorites, roches lunaires ou martiennes, poussières de comètes) qui sont formés aussi lors des processus géologiques sont donc constitués de minéraux à part entière. Par contre, les substances dites synthétiques ou anthropogéniques, car entièrement produites par l'humain lors de processus industriels (métaux raffinés, alliages, scories, briques, ciments, cristaux synthétiques, etc.) ne sont pas des minéraux, de même que les substances issues de processus strictement biologiques (calculs rénaux, dépôts articulaires, dents, os, coquilles de mollusques, perles, corail, etc.). Toutefois, si des processus géologiques mêmes discrets ont affecté ces substances biologiques et qu'elles ont recristallisé (fossilisation, métamorphisme), on peut dès lors les considérer comme des espèces minérales à part entière (dépôts cristallins de guano, fossiles de bois silicifié, charbon transformé en graphite, etc.).

Au sein d'une même espèce minérale on peut définir des variétés selon la couleur ou la morphologie des cristaux. Ces différentiations se font surtout dans les domaines de la gemmologie et de la joaillerie. Ainsi dans le cas des pierres précieuses, on peut citer en exemple l'espèce minérale « corindon » et ses variétés rubis rouge et saphir bleu ; ou mieux, l'espèce minérale « béryl » et ses variétés émeraude verte, aigue-marine bleue, morganite rose, héliodore jaune et goshénite incolore.

Il est tentant de faire des parallèles entre le règne minéral et le règne du vivant. Si la nomenclature est quelque peu différente, il n'en demeure pas moins que les caractérisations des minéraux par l'approche chimique (composition) et structurale (ordre cristallin) s'apparentent à la caractérisation génétique et biochimique des espèces du vivant. Toutefois, ce parallèle est hors de propos quant au nombre d'espèces. La définition d'espèce minérale, plutôt réductrice, limite ce nombre à seulement 5'414 espèces minérales décrites jusqu'en septembre 2019 sur la Terre, la Lune, Mars, dans les météorites et dans les poussières cosmiques (Pasero 2019). Ce chiffre est sans commune mesure avec les 8,7 millions d'espèces vivantes peuplant la Terre. Dans le cas des minéraux, afin d'éviter les doublons et de se prémunir d'erreurs scientifiques, les nouvelles espèces ne sont approuvées qu'à la suite d'une longue procédure descriptive, suivie d'une homologation finale sanctionnée par le vote d'une commission internationale, unique détentrice des droits d'homologation (Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification).

Contrairement aux roches formées par un assemblage massif de minéraux, dans la nature, rares sont les minéraux qui se présentent en cristaux bien développés et donc libres. Ils se développent dans des vides comme les géodes, les fractures ouvertes ou les cavités karstiques au sein des roches. Cette cristallogenèse a lieu lors du refroidissement et/ou du dégazage de solutions aqueuses enrichies en ions au contact de la roche mère. C'est le cas ici de la calcite du Jura vaudois dont les cristaux peuvent se rencontrer dans des géodes au sein des calcaires, mais aussi comme tapissages de fissures ou sous la forme de concrétions cristallines dans des grottes. Dans ces cavités, le transport des ions calcium et carbonate, issus de la dissolution partielle de la roche mère, s'effectue par le biais de solutions aqueuses riches en dioxyde de carbone. La baisse de la pression partielle de ce dernier dans les vides de la roche provoque la précipitation de la calcite cristalline.

Rappelons aussi qu'un cristal, base de tout minéral, est un corps solide présentant généralement une morphologie géométrique bien définie par des faces planes et des arêtes rectilignes. À l'échelle submicroscopique, le cristal présente un arrangement d'atomes ou de molécules selon une géométrie précise et propre à chaque espèce minérale. Cet état solide ordonné de la matière s'oppose à l'état gazeux, liquide et vitreux ou amorphe.

Un cristal peut être décrit comme un assemblage, dans les trois directions de l'espace, de mailles élémentaires. Ces dernières, en quelque sorte les « briques élémentaires » de l'édifice cristallin sont de composition chimique, de dimensions et de formes constantes au sein de chaque espèce minérale, reflétant ainsi la disposition interne des atomes et des molécules qui les composent. Une maille élémentaire possède trois paires d'arêtes non parallèles, souvent de longueurs différentes et qui s'interceptent à des angles pouvant être de 90° ou non. Une maille élémentaire dans les trois directions spatiales forme un système de coordonnées tridimensionnel permettant ainsi de décrire un cristal et donc un minéral. Ainsi l'étude de la morphologie externe des cristaux, à savoir la position des faces cristallines par rapport au système de coordonnées, montre que les faces ne sont pas dans des orientations aléatoires, mais se situent toujours selon des orientations particulières par rapport à la maille unitaire. Les valeurs des angles mesurés entre les axes du système de coordonnées, dont l'origine est sise au centre du cristal et les faces, peuvent être réduites à des multiples de nombres entiers. Dès lors, une fois les dimensions de la maille élémentaire établies par des méthodes radiocristallographiques (diffraction de rayons-x) pour une espèce minérale donnée, cette approche permet de quantifier l'orientation de chaque face d'un cristal par le biais d'observations et de mesures naturalistes utilisant la goniométrie optique.

On pourrait aussi caractériser une face donnée d'un cristal par le biais de trois nombres qui représentent ses interceptions avec les trois axes de la maille élémentaire. Toutefois pour des raisons pratiques, il est plus pertinent d'utiliser des indices dérivés des réciproques des intersections réduites. Ainsi, à titre d'exemple, si les intersections d'une face par les trois axes sont à 6, 3 et 2 unités, nous prenons les inverses : 1/6, 1/3 et 1/2, et supprimons ensuite les fractions en multipliant chacune d'entre elle par la plus grande unité mesurée, à savoir 6, pour obtenir 1, 2 et 3. Ces indices sont appelés indices de Miller et vont s'écrire (123) dans le cas de cette face.

La Calcite

La calcite est un simple carbonate de calcium anhydre, de formule $CaCO_3$ et qui cristallise dans le système trigonal à réseau rhomboédrique. Sa première description remonte à l'an 77 environ par *Gaius Plinius Secundus* (Pline l'Ancien) et son nom est dérivé de *calx* en latin ou *khalx* en grec signifiant « chaux ».

En volume, la calcite constitue 22 % des roches sédimentaires terrestres (Lebrun *et al.* 1998). Minéral connu et étudié de longue date et d'une grande abondance terrestre, la calcite est assez peu estimée des minéralogistes et des collectionneurs amateurs. Toutefois, en raison de la grande variété de formes cristallographiques qu'elle peut arborer, la calcite est l'une des espèces minérales les plus fascinantes.

La calcite possède à la fracturation un clivage triple et parfait, délimitant ainsi des rhomboèdres de rapports axiaux identiques à ceux de sa maille élémentaire (Haüy 1782). Généralement incolore, ce minéral présente une biréfringence intense, ou double polarisation,

très caractéristique. Facilement soluble dans les acides forts avec une vive effervescence, la calcite est aussi un minéral assez tendre, aisément rayé par l'acier ou le verre. Ainsi, les propriétés énumérées ci-dessus rendent sa diagnose aisée.

Dans l'ensemble des espèces minérales, la calcite est celle qui offre probablement des cristaux avec la plus grande variété morphologique. Ainsi des centaines de formes issues de l'assemblage multiple de faces cristallines ont été observées et décrites. Toutefois, au premier abord, pour le naturaliste de terrain, la calcite se reconnaît à l'aspect de ses groupements microcristallins et qui s'assemblent pour constituer des masses grenues, des agrégats lamellaires, fibreux, stalactitiques, terreux, subéreux, concrétionnés, lenticulaires, nodulaires, coralloïdes, bacillaires, radiés, mamelonnés ou crayeux.

Élements de morphologie cristalline de la calcite

La maille élémentaire morphologique de la calcite possède deux longueurs *a* de même valeur qui forment un angle de 120° entre-elles et, tridimensionnellement, un axe *c* perpendiculaire à ceux-ci qui est 0,8543 aussi long que les longueurs *a* (figure 1). Cette maille élémentaire est basée sur l'étude morphologique qui permet d'établir la forme et le rapport *c*/*a* de cette maille mais pas ses dimensions absolues. L'analyse structurale de la calcite par la méthode de diffraction des rayons-x montre une longueur de *c* quatre fois plus grande (Maslen *et al.* 1993). Par soucis de simplification, dans cet article, tous les indices de Miller sont donnés par rapport à la maille élémentaire morphologique.

Les éléments de symétrie de la calcite sont peu nombreux mais leurs opérations combinatoires conduisent à de multiples formes. Ainsi l'axe *c* de la calcite est un axe de symétrie ternaire, de sorte qu'une rotation de 120° ou de 240° autour de cet axe laisse le motif du cristal inchangé. Il existe aussi un centre de symétrie hémiédrique. Les axes *a* sont des axes de symétrie rotatoire binaire associés à des plans miroirs qui leur sont perpendiculaires. Il existe enfin un troisième axe de symétrie rotatoire binaire situé à 120° par rapport aux deux axes *a* et placé dans leur même plan. Toutefois cet axe est géométriquement redondant puisque deux lignes quelconques définissent un plan et une base pour son analyse quantitative. Du fait de l'approche descriptive quadriaxiale des cristaux de calcite, les indices selon la notation de Miller sont parfois donnés avec quatre indices, comme *hkil*, où *h*, *k*, *i* et *l* sont des entiers et où le troisième indice *i* est égal à la somme des deux premiers, changée de signe - (*h* + *k*). Dans nos descriptions de formes, nous suivons la pratique actuelle et omettons l'indice *i*.

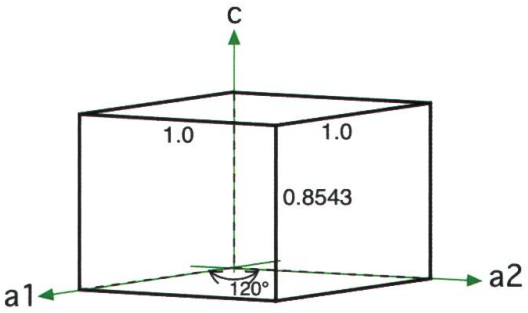

Figure 1. Représentation de la maille élémentaire morphologique de la calcite, en forme de prisme losangique avec les rapports axiaux.

Il existe six formes de base de cristaux de calcite qui sont présentées dans la figure 2. La forme la plus souvent rencontrée est le scalénoèdre qui possède 12 faces, six « en haut » et six « en bas » (figure 2A et 3). Chaque face est un triangle scalène qui recoupe à la fois les axes *c* et *a*. Les arêtes sises entre les faces supérieures et inférieures définissent une ligne brisée zigzag. Les autres formes de calcite dérivent d'un scalénoèdre primitif, prenant un aspect différent lorsque les faces sont orientées dans des positions spéciales par rapport aux axes de symétrie. Ces formes ont parfois même moins de faces que le scalénoèdre.

Le prisme hexagonal ouvert (figure 2B) présente évidemment six faces, toutes parallèles à l'axe *c*. Il y a en fait deux prismes différents, l'un avec des faces qui recoupent les deux axes *a* à distance égale du centre, et l'autre avec des faces qui ne coupent qu'un axe et sont parallèles à l'autre.

Le prisme di-hexagonal ouvert (figure 2C) est très rare dans le monde, on le connaît par exemple à Pleasant Ridge, Indiana, États-Unis (Brock 1993a), il possède 12 faces, toutes parallèles à l'axe *c* et recoupant chacune les deux axes *a* à des distances différentes du centre.

La bipyramide hexagonale (figure 2D) possède 12 faces. Chaque face est un triangle isocèle. Les faces de la bipyramide hexagonale croisent les axes *a* à distance égale. Cette forme est plutôt rare dans le monde à l'exception du Midwest des États-Unis et de l'île de Gotland en Suède.

Le rhomboèdre (figure 2E et 4) possède six faces. Chaque face est un losange qui recoupe l'axe *c* et un seul axe *a* et est parallèle au second axe *a*.

Le pinacoïde (figure 2F) est composé de deux faces parallèles entre elles et perpendiculaires à l'axe *c*, leur contour est déterminé par les faces qui les délimitent.

Enfin, pour complexifier encore plus cette approche morphologique de la calcite, il faut mentionner qu'il existe deux types de rhomboèdres et deux types de scalénoèdres, appelés posi-

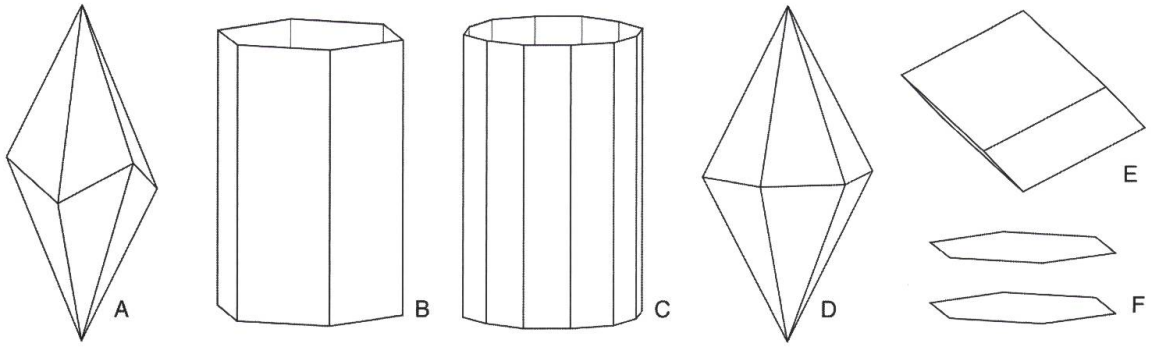

Figure 2. Les six formes de cristaux de calcite: A scalénoèdre, B prisme hexagonal, C prisme di-hexagonal, D bipyramide hexagonale, E rhomboèdre et F pinacoïdes basal.

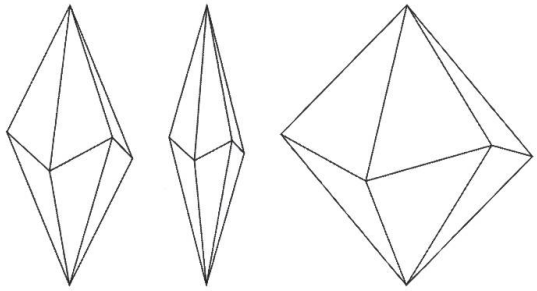

Figure 3. Exemples de scalénoèdres de calcite.

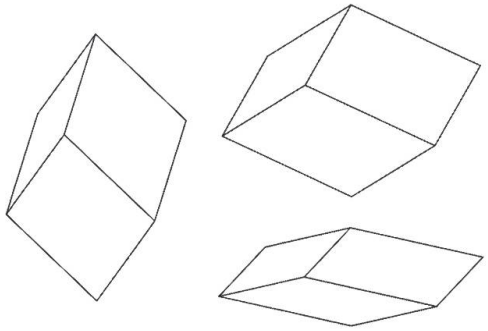

Figure 4. Exemples de rhomboèdres de calcite.

tifs et négatifs. Ces éléments de paires de formes ne peuvent pas être distingués visuellement les unes des autres, sauf en se référant aux traces de clivage du moins si ces dernières sont visibles.

Formes fermées et ouvertes

La plupart des formes de calcite délimitent un volume d'espace uniquement avec les faces appartenant à la forme intrinsèque, celles-ci sont appelées des formes fermées. Cependant, dans le cas des prismes et du pinacoïde, ces formes dites ouvertes ne délimitent pas totalement l'espace; elles doivent donc être combinées avec une autre forme pour enfermer totalement l'espace et définir ainsi un cristal.

Formes fixes et variables

Dans les systèmes cristallins, certaines formes sont fixes tandis que d'autres sont variables. Dans le système isométrique, par exemple, le cube et l'octaèdre sont des formes fixes. Dans le système rhomboédrique de la calcite, par contre, toutes les formes sont variables. Même contraints par la loi des indices rationnels simples, dans le cas de la calcite on observe des centaines de rhomboèdres et de scalénoèdres différents mais heureusement, seul un nombre beaucoup plus restreint est commun (Brock 1993b). Ainsi, Palache (1943) énumère plus de 700 différentes formes cristallines de calcite qui incluent presque 140 rhomboèdres et plus de 400 scalénoèdres.

Combinaisons de formes

Les cristaux de calcite sont rarement composés d'une seule forme et les combinaisons multiples, comme celle présentée par exemple sur la figure 5, sont ubiquistes. Toutes morphologies confondues, Goldschmidt (1913), dans sa magistrale compilation, présente 2'544 dessins d'habitus différents, illustrés sur 152 planches, ce qui fait de la calcite l'espèce minérale offrant le plus de variabilité morphologique.

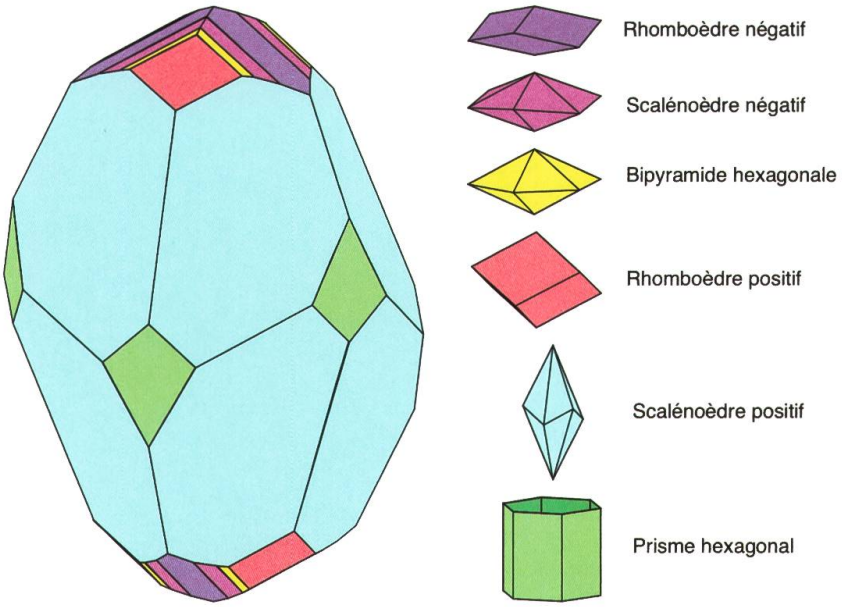

Figure 5. Exemple d'un cristal de calcite aux habitus complexes résultant de la combinaison de six formes présentées séparément à droite. Les faces sur le cristal complexe ont la même couleur que celles des formes élémentaires.

Les cristaux maclés

Rappelons qu'une macle est l'association de deux ou plusieurs monocristaux d'une même espèce minérale selon des directions et des plans cristallographiques bien définis appelés plans de macle. Il faut veiller à ne pas confondre des cristaux maclés avec des cristaux groupés et imbriqués fortuitement.

Le mode de croissance cristallin le plus susceptible d'être confondu avec le maclage est la croissance en parallèle de deux cristaux lorsque deux parties d'un cristal sont séparées par une arête ou un angle rentrant. La figure 6 gauche montre que dans une vraie macle, les mêmes faces se rencontrent sur les deux moitiés d'une macle, dans une position comme vue dans un miroir imaginaire passant par le plan de maclage. Par contre, sur la figure 6 à droite, dans le cas de la croissance en parallèle, les mêmes faces peuvent apparaître, mais se situent comme dans une image en double décalée, sans miroir.

Les macles sont en général rares dans la calcite et elles sont régies par quatre lois (Richards 1999) (figure 7) :

1. La macle parallèle au plan basal (001), où les axes *c* sont dans le même alignement. Cette macle introduit un plan équatorial de symétrie généralement souligné par des angles rentrant au centre du cristal. Ces angles rentrants font défaut lorsqu'un prisme se développe. Dans le monde, cette loi de maclage est la plus courante pour la calcite.
2. La macle parallèle au rhomboèdre négatif (012) et dont les axes *c* du cristal composite forment un angle de 127°29.5'. C'est ce type de macle dite polysynthétique qui est à l'origine de stries parallèles parfois visibles sur les faces des cristaux. Pour la calcite, cette macle est la deuxième la plus courante.
3. La macle parallèle au rhomboèdre positif (101), où les axes *c* forment un angle de 90°46'. Cette macle est plutôt rare.
4. La macle parallèle au rhomboèdre négatif (021) avec un angle entre les axes *c* valant 53°46'. Elle ne se rencontre qu'exceptionnellement.

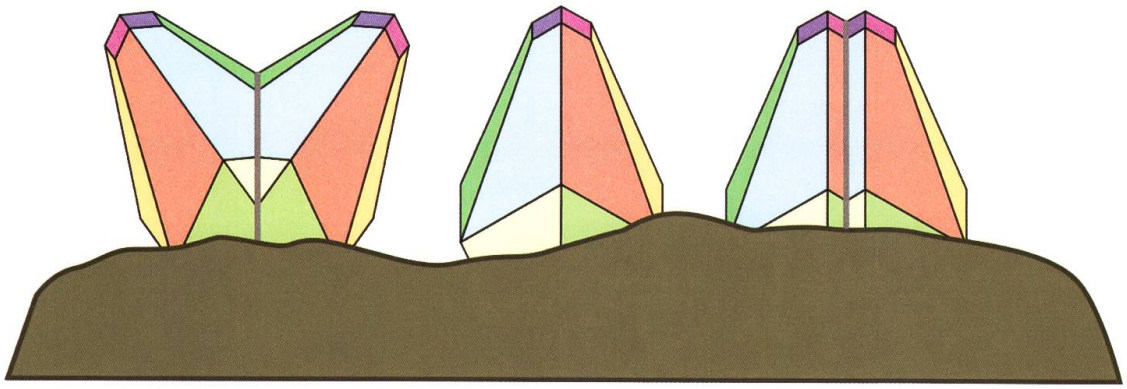

Figure 6. Représentations idéalisées de cristaux de calcite maclés ou non. Les couleurs dans les trois dessins identifient exactement les mêmes faces. **À gauche:** macle par réflexion, la ligne centrale grise, représente un plan miroir vertical qui est perpendiculaire au plan du dessin. Chaque face possède donc un équivalent par réflexion mais ces faces sont orientées dans des directions opposées l'une de l'autre. **Au centre:** cristal non maclé appelé aussi monocristal. **À droite:** croissance en parallèle composée de deux parties qui donnent l'impression d'être une macle. La ligne centrale grise représente le contact entre les deux moitiés de la croissance en parallèle. Chaque face possède un équivalent sur le contact auquel elle est parallèle. Le contact semble être un plan de symétrie, mais les deux moitiés ont la même orientation, c'est-à-dire qu'elles sont cristallographiquement continues car faisant partie d'un même monocristal. Ce n'est donc pas une macle.

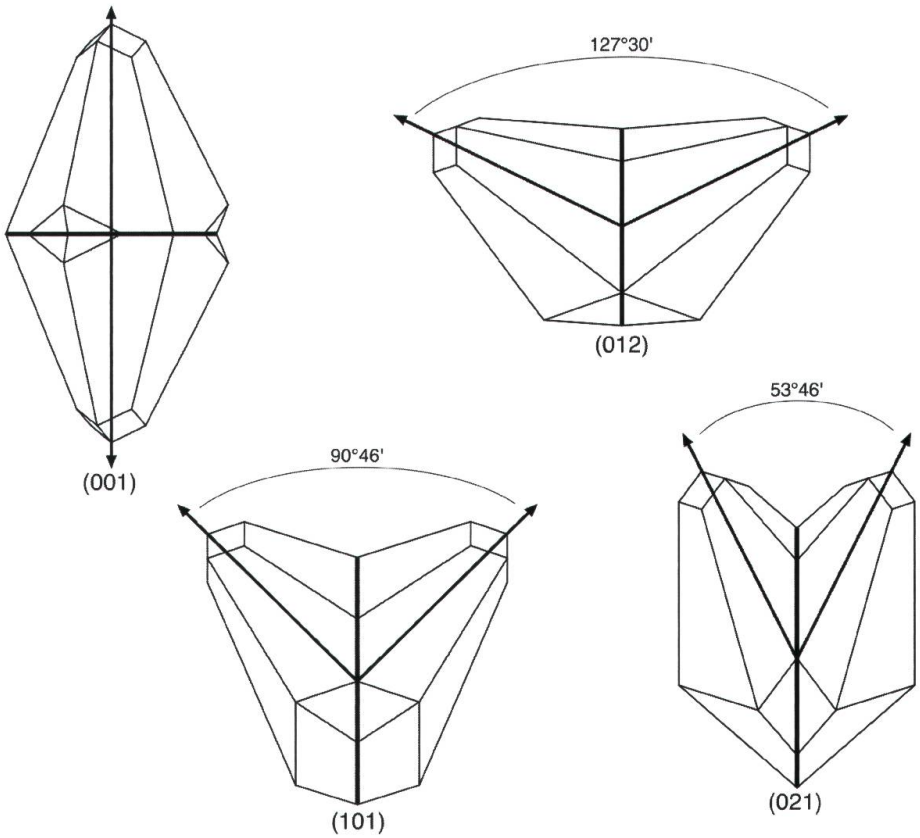

Figure 7. Les quatre lois de maclage de la calcite.

Certains auteurs suggèrent qu'il existe encore une cinquième loi de maclage de la calcite liée à la présence d'un axe de rotation (Parker & Diehl 1945). Cependant, Drugman (1948) a démontré que cette macle est identique à la macle parallèle au rhomboèdre négatif (012).

Si lors de la croissance de cristaux maclés, de nombreuses formes se sont développées, la combinaison de ces morphologies peut être extrêmement complexe et son décryptage devient très difficile. Seules des mesures goniométriques, optiques ou radiocristallographiques peuvent résoudre cette problématique.

Relevons que nos observations sur de nombreux cristaux de calcite vaudoise confirment les observations antérieures par Kreutz (1905 et 1909), Richards (1999) et Rykart (1986), à savoir que les cristaux maclés sont généralement plus grands que les monocristaux. La raison réside dans le fait que la croissance cristalline est plus rapide le long d'un plan de macle.

La calcite du Jura vaudois

Constituante essentielle du calcaire et des marnes, la calcite est ubiquiste dans les géodes, fractures et cavités karstiques Jura vaudois. Par contre, à quelques remarquables exceptions près, ses cristaux généralement millimétriques sont souvent peu esthétiques. Les formes se limitent aux prismes et rhomboèdres, généralement laiteux à cause de leur exposition à l'eau. Les cristaux scalénoèdriques, pourtant très répandus dans le monde, sont ici plutôt rares et les cristaux décimétriques sont exceptionnels.

Le Jura vaudois est constitué de roches sédimentaires, principalement des sédiments marins déposés lorsque l'ancien territoire était couvert d'une mer tropicale. Les calcaires et marnes de

l'ère Secondaire datent des périodes du Crétacé (environ -145 à -66 millions d'années) et du Jurassique (environ -201 à -145 millions d'années). La période du Crétacé est principalement représentée par des unités de calcaire massif alternant avec des marnes. Les calcaires blancs de l'Urgonien sont intensément exploité dans les carrières de La Sarraz (figure 8) et du Mormont à Éclépens (figure 9) comme granulats et pour la fabrication du ciment. Autrefois, ce calcaire urgonien était largement utilisé comme pierre de construction sous la forme de moellons. Un autre calcaire assez répandu, également du Crétacé, est celui de l'Hauterivien appelé aussi Pierre jaune de Neuchâtel. Un ancien site d'exploitation célèbre se trouve à la « Carrière jaune » qui se situe sur le territoire de la commune de Ferreyres. La résistance mécanique de cette roche, sa faible fracturation et sa teinte jaune l'ont fait utiliser massivement dans les anciennes maisons ou châteaux, que l'on rencontre dans les villages des environs.

Les roches du Jurassique forment la majeure partie des sommets du Jura vaudois (la Dôle, le Mont Tendre, le Suchet, le Chasseron). Ce sont essentiellement des calcaires et des marnes localement fossilifères, mais qui souvent affleurent assez peu à cause de la couverture végétale de forêts et de pâturages.

Lors de sa formation à la fin de l'orogenèse alpine, il y a environ 5 millions d'années, la chaîne jurassienne a été peu affectée par des événements thermiques. Ainsi, les minéraux qui ont cristallisé dans les fractures lors de ce plissement, l'ont fait sous des conditions thermiques basses, dites épithermales, de l'ordre de 50 à 70 °C (de Haller 2015). Toutefois, dans des secteurs intensément affectés par de grandes failles profondes, en particulier dans le compartiment La Sarraz - Le Mormont - Vallon du Nozon, des températures plus élevées ont pu être localement atteintes par l'entremise de circulations hydrothermales.

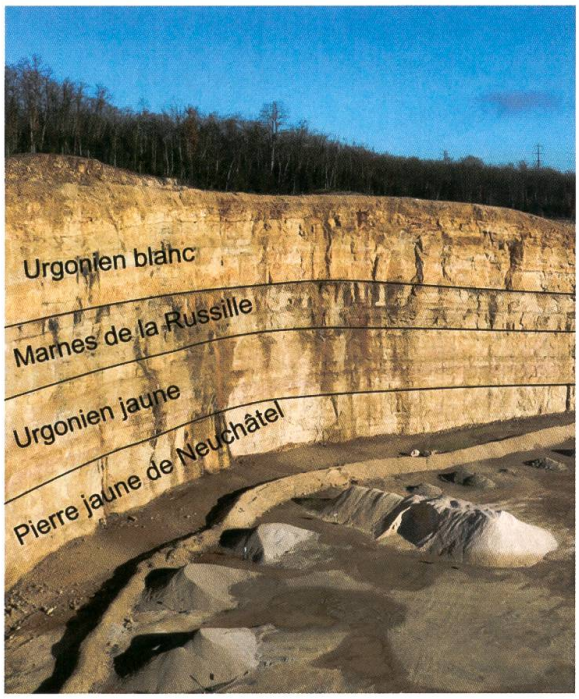

Figure 8. Lithostratigraphie sommaire de la carrière des Buis près de La Sarraz en direction du nord-est, selon le Dr Antoine Pictet (image prise le 3 janvier 2017).

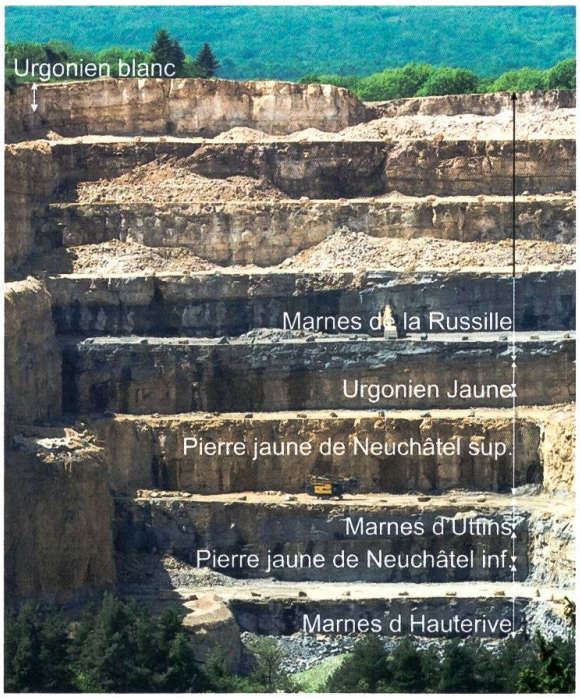

Figure 9. Lithostratigraphie sommaire de la carrière du Mormont près d'Éclépens en direction ouest, selon le Dr Antoine Pictet (image prise le 25 mai 2017).

Méthodologie

Les cristaux récoltés sur le terrain ou issus des collections du Musée cantonal de géologie ont été examinés sous une loupe binoculaire (ou stéréo microscope). Cette approche simple et naturaliste permet déjà de déterminer plus de 95 % des morphologies qui sont souvent classiques et très répétitives. Pour les cas plus complexes, il a été nécessaire de détacher les cristaux de leur matrice afin d'en faire l'étude goniométrique fine. Les cristaux isolés sont montés sur une tête goniométrique puis dans un goniomètre optique à deux cercles de marque STOE, Heidelberg. Les échelles de Vernier permettent une mesure précise des angles entre les faces cristallines, plus que suffisante pour identifier et indexer les faces d'un minéral déjà bien connu. Les indices préliminaires de Miller sont calculés en utilisant un logiciel personnalisé qui implémente des formules trigonométriques reliant les mesures angulaires aux indices de Miller apparents. Ces indices sont ensuite testés afin de définir le choix des indices réels à utiliser pour dessiner le cristal. Ces indices sont ensuite utilisés dans le logiciel SHAPE (www.shapesoftware.com; *consulté le 3 octobre 2019*) et les distances centrales sont ajustées pour fournir le dessin d'un cristal idéalisé. Exceptionnellement, dans le cas de cristaux inframillimétriques, l'étude morphologique s'est basée sur des images et des mesures d'angles réalisées sur des cristaux isolés, métallisés par de l'or en phase vapeur et observés avec un microscope électronique à balayage CamScan MV 2300 SEM sous un voltage de 20 kV, un courant d'échantillon de 0,5 nA et une distance de travail de ~ 35 mm.

Tout au long de cette étude, une collection d'échantillons de référence a été constituée. Elle est préservée au Musée cantonal de géologie de Lausanne dans la section des gîtes minéraux régionaux.

Les sites étudiés

Le Musée cantonal de géologie à Lausanne possède de nombreux échantillons de calcite du Jura vaudois récoltés depuis la fin du XVIIIe siècle et regroupés dans la collection des gîtes minéraux régionaux. Lors de ces 25 dernières années, les carrières d'Éclépens et de La Sarraz ont été minutieusement explorées par le premier auteur. L'exploitation permanente du calcaire et de la marne permet d'accéder continuellement à des échantillons frais, pas ou peu altérés, ce qui représente une opportunité unique pour le scientifique.

Au total ce sont 23 sites, répertoriés dans le tableau 1, qui ont livré des cristaux de calcite étudiés.

Résultats

Typologie morphologique des cristaux de calcite du Jura vaudois

Il serait illusoire de tenter de décrire par le texte uniquement toutes les formes cristallines rencontrées dans le Jura vaudois tant elles sont nombreuses et, souvent, complexes. Ainsi, les observations naturalistes et les mesures en laboratoires ont permis l'élaboration de nombreux dessins idéalisés de cristaux, qui, mis en relation avec les photographies des spécimens étudiés, permettent au lecteur une compréhension facilitée au travers d'une visualisation immédiate. Les tableaux 1, 2 et 3 présentent les formes et indices observés dans les différents sites étudiés.

Tableau 1. Inventaire des sites du Jura vaudois recelant des cristaux de calcite étudiés dans ce travail.

Lieu-dit	Commune	Coordonnées	Roche et étage géologique	Indices observées	Remarques
Col de Porte, La Dôle	Gingins	2'495'400/1'143'080	Calcaire Kimméridgien	100, 012	Zone faillée
Carrière de la Violette	Arzier	2'504'015/1'145'815	Calcaire Valanginien	211, 101	
La Rochette	St-George	2'509'500/1'153'300	Calcaire Kimméridgien	021	
Carrière du Pralet	L'Abbaye	2'515'990/1'165'220	Calcaire Oxfordien	100, 012	Zone faillée
Les Mines, Le Risoux	Le Chenit	2'505'205/1'165'560	Calcaire Kimméridgien	021, 211	Ancienne mine de fer
Carrière de la Combe Noire	Le Lieu	2'508'885/1'165'800	Calcaire Kimméridgien	100, 012	
Route Vallorbe-Mont d'Orzières	Vallorbe	2'515'500/1'172'650	Calcaire Oxfordien	100, 012	
Haut du Reposoir	Vallorbe	2'515'625/1'172'725	Calcaire Oxfordien	021	
Bas du Reposoir	Vallorbe	2'516/310/1'172/965	Calcaire Kimméridgien	100, 012, 101, 012 ?	
Grottes de l'Orbe	Vallorbe	2'516'420/1'172/460	Calcaires Oxfordien et Kimméridgien	100, 012, 021	Spéléothèmes néoformés
Carrière souterraine de Béboux	Vallorbe	2'518'500/1'172'820	Marne Oxfordien	211, 101	
Gorges du Day	Vallorbe	2'520'975/1'175'050	Calcaire Kimméridgien	110, 211, 321, 541	
Barrage du Day	Vallorbe	2'520'870/1'175'180	Marne Purbeckien	021	
Gorges de l'Orbe	Vallorbe	Nombreux sites	Calcaire Oxfordien	211, 101, 100, 012	Nombreux sites
Les Clées	Les Clées	2'525'375/1'175'890	Marne Purbeckien	211, 012	
Carrière des Buis	La Sarraz	2'528'110/1'168'240	Calcaire Urgonien	Nombreuses	Voir tableau 2
Carrière d'Eclépens	Eclépens	2'530/870/1'167/520	Calcaire et marnes Hauterivien-Urgonien	Nombreuses	Voir tableau 3. Avec bitume. Zone faillée
Trois-Villes	Baulmes	2'530'860/1'183'780	Calcaire Oxfordien	100, 211, 101, 012	
Mines de Baulmes	Baulmes	2'530'295/1'182'790	Marne Oxfordien	100, 012, 211 ?	Avec la céléstine
Route Vuiteboeuf-Ste-Croix	Ste-Croix	2'532'375/1'185'025	Calcaire Kimméridgien	100, 012	
Mont des Cerfs	Ste-Croix	2'526'940/1'185'190	Calcaire Oxfordien	100, 012, 101	
Col des Etroits	Ste-Croix	2'528'090/1'187'020	Calcaire Oxfordien	100, 211, 101, 012	
Moulin Cossaux	Chamblon	2'536'790/1'181'600	Calcaire du Valanginien	012>>101	Avec oxydes de fer ou bitume. Zone faillée

Tableau 2. Liste des formes et indices de la calcite de la carrière des Buis à La Sarraz observés et illustrés dans ce travail.

Formes	Indices	Figures
Prismes	100	11, 19, 21, 23, 28, 38, 50, 55, 67, 70
	110	32, 34, 36, 42, 44, 48, 53, 70
	340	32, 34, 48, 72
Bipyramides	113	28, 32, 34, 36, 42, 44, 48, 53, 55, 72
Rhomboèdres	012	11, 19, 23, 28, 36, 38, 46, 50, 53, 67, 70
	101	19, 21, 23, 28, 32, 34, 36, 42, 44, 46, 48, 53, 55, 67, 70, 72
	401	25, 44
Scalénoèdres	131	44
	211	11, 32, 34, 36, 42, 44, 46, 48, 53, 67, 70, 72
	212	55
	214	23
	312	55
	315	28
	413	67
	514	19, 21, 23

Tableau 3. Liste des formes et indices de la calcite de la carrière du Mormont à Éclépens observés et illustrés dans ce travail.

Formes	Indices	Figures
Prismes	100	17, 63, 65, 77
Bipyramides	113	17
Rhomboèdres	012	13, 17, 63, 65, 77
	025	17
	101	13, 17, 30
	801	65
Scalenoèdres	125	17
	214	17

Cristaux simples

Les cristaux simples les plus fréquemment rencontrés sont les rhomboèdres combinés ou non à un prisme (figures 10 et 11, 12 et 13). Ce type de cristaux est ubiquiste, en particulier dans les cavités tapissées de cristaux des calcaires. Cette combinaison simple peut parfois apparaître en cristaux dont la morphologie globale rappelle celle des sceptres (figures 10 et 11, 76 et 77). Les scalénoèdres, parfois multiples, sont moins répandus et se limitent surtout – mais pas seulement – aux calcaires marneux du Jurassique supérieur dans le Purbeckien des Gorges de l'Orbe et dans les Couches d'Effingen de l'Oxfordien à Vallorbe et à Baulmes (figures 14 et 15) ; dans tous ces sites la calcite s'associe intimement à la célestine (Andermatt *et al.* 2008).

Cristaux à combinaisons multiples

Des cristaux dont la morphologie résulte de la combinaison des trois formes que sont rhomboèdres, prisme et scalénoèdre sont relativement rares dans le Jura vaudois ; ils se rencontrent dans les carrières de La Sarraz et d'Éclépens (figures 16 et 17, 18 et 19, 20 et 21, 22 et 23, 37, 39, 64 et 65, 66 et 67). À la carrière de La Sarraz, exceptionnellement, des phénomènes liés à des surcroissances de calcite microcristalline sur certaines faces mettent en évidence de façon spectaculaire ces combinaisons (figures 68, 69 et 70).

Figure 10. Cristal sceptre de calcite constitué d'un prisme hexagonal avec un rhomboèdre sommital, l'ensemble s'étant développé sur un cristal scalénoèdrique. Largeur d'image 8 mm, La Sarraz.

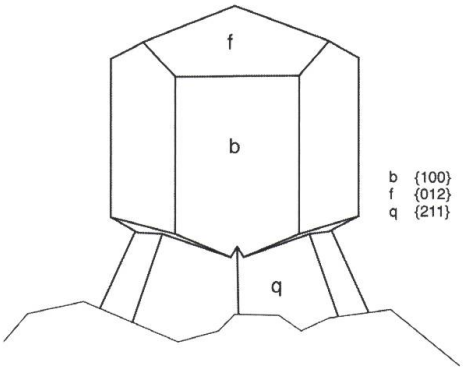

Figure 11. Dessin idéalisé du cristal sceptre illustré à la figure 10 avec des faces indexées selon la notation de Miller, comme dans toutes les figures suivantes avec des dessins idéalisés.

Figure 12. Empilement de cristaux lenticulaires de calcite (rhomboèdres obtus). Cristaux de 3 mm, Éclépens.

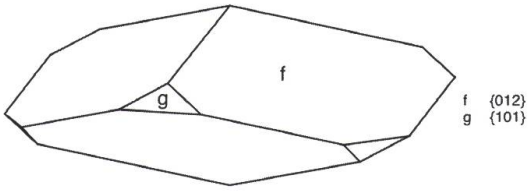

Figure 13. Dessin idéalisé d'un cristal lenticulaire isolé illustré à la figure 12.

Figure 14. Cristaux scalénoèdriques de calcite colorés en jaune par des traces de fer et constitués d'une multitude de faces. Largeur d'image 3 cm ; gorges de l'Orbe près du Day.

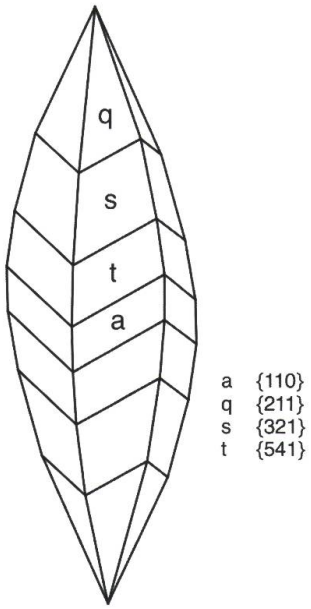

Figure 15. Dessin idéalisé d'un seul cristal scalénoèdrique illustré à la figure 14.

Cristaux maclés

Véritables quintessences de la morphologie cristalline de la calcite du Jura vaudois, les macles se rencontrent sporadiquement. Ainsi, sur les quatre macles de calcite mondialement reconnues, deux ont été mises en évidence dans notre étude.

La macle selon (001) se rencontre à la carrière de La Sarraz (figures 24 et 25, 27 et 28). À ce jour, cette macle a été observée une unique fois à la carrière d'Éclépens (figure 26) et elle a aussi été observée aux Clées et à Concise au début du siècle, lors du percement d'un tunnel autoroutier.

La macle selon (012) est étrangement la plus courante dans la carrière de La Sarraz. Elle s'y pare souvent de combinaisons multiples et de surcroissances abondamment illustrées dans les figures 31 à 55. Cette macle a aussi été observée plus rarement dans la carrière d'Éclépens (figures 29 et 30, 46 et 47, 55 et 56).

Enfin notons que dans le Jura vaudois, et ceci malgré des observations attentives, aucune macle selon (021) ou selon (101) n'a été découverte lors de notre étude.

Cristaux inhabituels à la morphologie multiple et complexe

La combinaison de formes simples et de macles, l'ensemble couronné souvent par des surcroissances cristallines et des départs de clivages sous des contraintes tectoniques tardives peuvent rendre très difficile l'interprétation des cristaux. Trois facteurs conduisent à la complexité morphologique singulière qui caractérise souvent les cristaux de calcite récoltés à la carrière de La Sarraz.

Le premier est la fréquence des macles tabulaires selon (012), visibles par exemple dans les figures 31, 35, 43 et 47. Sur certains échantillons, plus de la moitié des cristaux visibles sont maclés de cette manière, bien que beaucoup ne soient pas aussi idéalement orientés pour être visualisés sur ces figures.

Un second facteur est le maclage mécanique polysynthétique (figure 56 et 57) qui s'exprime en fines lamelles dans certains cristaux ; ces lamelles sont orientées selon (012) suite aux contraintes tectoniques. Ces lamelles se visualisent sous la forme de lignes, mais ces « lignes » sont en fait des paires de plans parallèles proches. Les domaines cristallins séparés par ces paires de plans sont maclé par rapport à ceux sis de part et d'autre des « lignes », définissant ainsi une mince tranche de calcite maclée. Les plans les plus remarquables sont orientés parallèlement au plan principal (012) de la macle de croissance. Ces lamelles sont souvent confondues avec les plans de macle de croissance supplémentaires, ce qui semble indiquer un maclage de croissance multiple. Cependant, le cristal sis de chaque côté d'une telle lamelle montre une simple orientation parallèle et non une macle. Il est difficile de savoir si le maclage mécanique a eu lieu avant ou après la croissance du cristal.

Il est même possible que le maclage mécanique provienne de la matrice et soit maintenu à mesure que le cristal se développe. Les lamelles maclées et les clivages associés font souvent l'objet d'une corrosion préférentielle, ce qui les rend plus visibles (figures 71 et 72).

Le troisième facteur de complexité est représenté par les surcroissances. On observe que nombre de cristaux ont connu une seconde période de croissance (figures 10 et 11 et surtout 66 et 67) impliquant des cristaux d'un habitus différent. Le plus souvent, les cristaux de première génération sont des scalénoèdres modifiés et les cristaux de deuxième génération sont des prismes terminés par le rhomboèdre négatif {012} (figures 10 et 11). Les surcroissances se

Figure 16. Calcite rhomboédrique selon (101) avec une multitude de petites faces définissant ainsi un dôme. Largeur d'image 18 mm ; Éclépens.

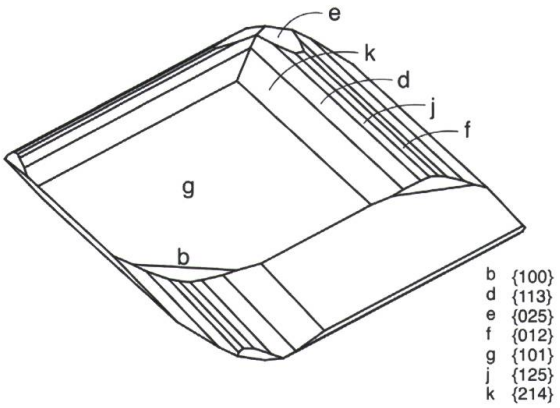

Figure 17. Dessin idéalisé d'un seul cristal rhomboédrique en dôme illustré à la figure 16.

Figure 18. Calcite rhomboédrique d'aspect grossièrement pseudocubique, avec au centre un cristal de sidérite jaune, $FeCO_3$, ayant cru selon la même orientation cristallographique. Largeur du cristal 2 mm ; La Sarraz.

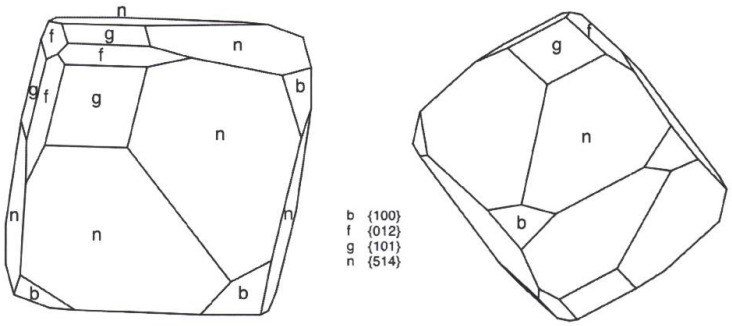

Figure 19. Dessins idéalisés de cristaux rhomboédriques d'aspect pseudocubique illustrés à la figure 18. À gauche : comme orienté dans la figure 18 ; à droite : dans l'orientation cristallographique habituelle avec l'axe c vertical.

Figure 20. Cristaux de calcite aux formes apparemment complexes avec des faces multiples. Largeur d'image 20 mm ; La Sarraz.

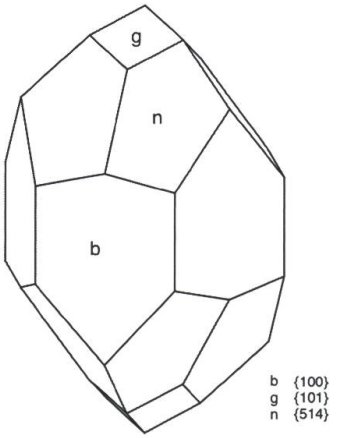

Figure 21. Dessin idéalisé d'un seul cristal rhomboédrique complexe, mais néanmoins pauvre en faces, illustré à la figure 20.

Figure 22. Calcite à formes multiples avec une symétrie trigonale bien visible. Diamètre du cristal 4 mm ; La Sarraz.

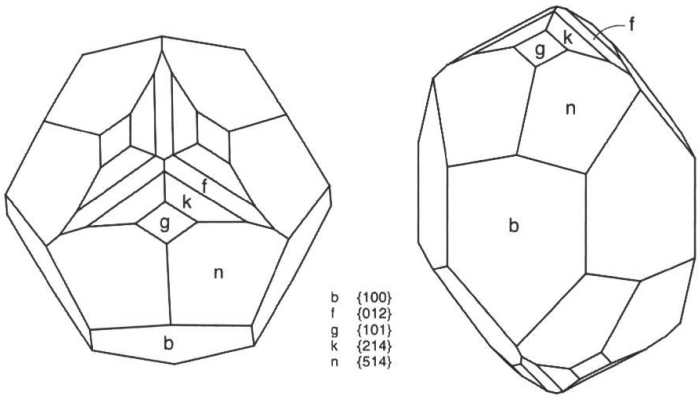

Figure 23. Dessin idéalisé d'un seul cristal rhomboédrique complexe, mais riche en faces terminales multiples, illustré à la figure 22. À gauche : comme orienté dans la figure 22 ; à droite : dans l'orientation cristallographique habituelle avec l'axe c vertical.

Figure 24. Calcite maclée selon (001) et constituée d'un rhomboèdre aigu. Largeur du cristal environ 8 cm ; La Sarraz.

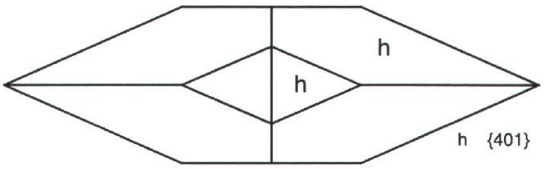

Figure 25. Dessin idéalisé de la macle selon (001) illustrée à la figure 24.

Figure 26. Calcite prismatique maclée selon (001), translucide, longueur du cristal 8 cm, sur des petites calcites. À ce jour une découverte unique à Éclépens.

Figure 27. Calcite maclée selon (012), en forme de cœur. Largeur du cristal 20 mm ; La Sarraz.

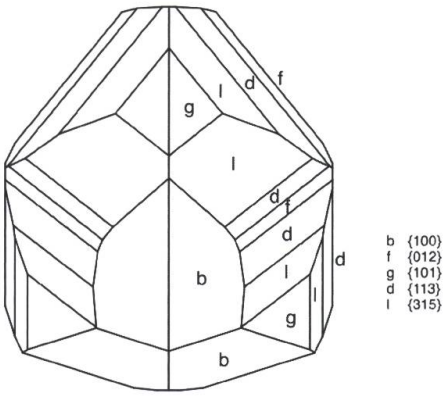

Figure 28. Dessin idéalisé de la macle selon (012), en forme de cœur illustrée à la figure 27.

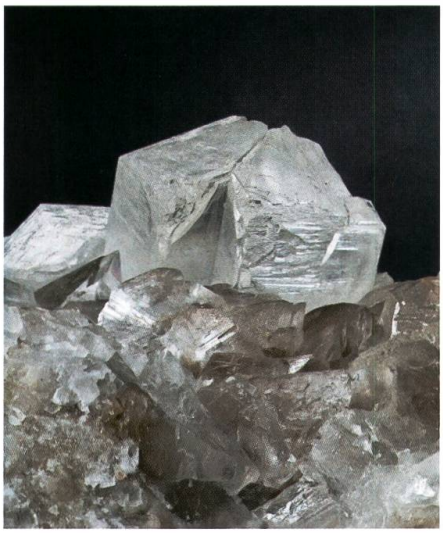

Figure 29. Calcite maclée selon (012). Largeur du cristal 7 mm ; Éclépens.

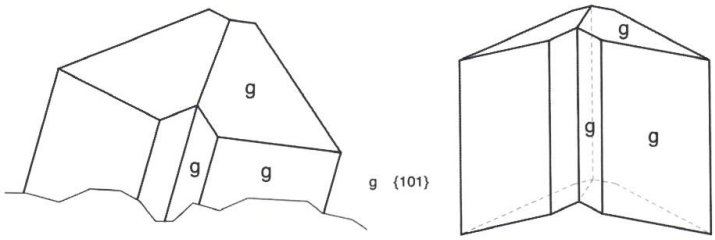

Figure 30. Dessins de la macle selon (012) illustrée à la figure 29.

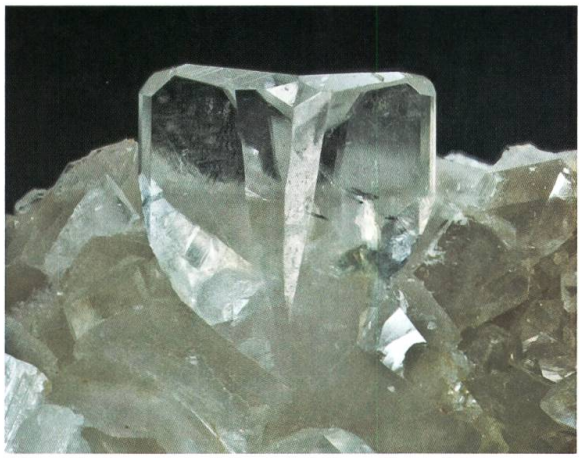

Figure 31. Calcite maclée selon (012) illustrée ici est la plus courante à La Sarraz et comme presque toutes les macles selon la loi (012) de ce gisement, elle possède des angles rentrants qui laissent apparaître une forme de «gouttière» (dièdre). Largeur du cristal 3 mm.

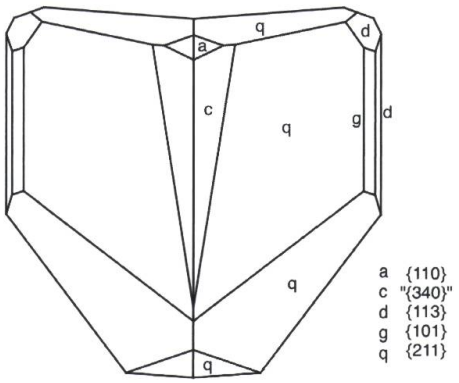

Figure 32. Dessin idéalisé de la macle selon (012) illustrée à la figure 31.

produisent aussi bien sur des cristaux maclés que non maclés, mais elles sont particulièrement visibles sur les macles tabulaires (012). Dans tous les cas, la calcite de deuxième génération a la même orientation que celle de la première génération ; définissant ainsi un domaine monocristallin continu. Les surcroissances sont apparues à différents endroits sur les cristaux de la première génération constituant ainsi des reliefs polyédriques qui présentent des habitus étranges (figures 37 à 39). Le site idéal de nucléation de cette seconde génération se situe le long de lamelles résultant d'un maclage mécanique sous contraintes (figures 56 et 57). Ce développement préférentiel démontre ainsi que le maclage mécanique a eu lieu, au plus tard, avant la deuxième génération de croissance. Notons que dans de très rares cas, des surcroissances multiples de cristaux aux formes basiques, rhomboèdres et prismes, en forme de sceptres (figures 10 et 11) peuvent constituer des surcroissances tardives sur des faces et des arêtes de cristaux rhomboédriques anciens. De pareils assemblages, qui rappellent les créneaux d'un château, sont toujours liés à la présence de bitume visqueux dans les cavités. Ils s'observent rarement et uniquement à la carrière d'Éclépens (figure 76). À la carrière de La Sarraz, exceptionnellement, certains scalénoèdres peuvent être partiellement recouverts de calcite néoformée, formant un poudrage pulvérulent blanc laiteux et lui-même constitué de minuscules cristaux scalénoèdriques aigus (figures 73 et 74).

Une trouvaille unique d'un cristal de calcite montrant une double croissance parallèle de deux générations a été faite à Éclépens (figure 62 et 63).

Cristaux à chapelets d'inclusions (« cristaux à âme »)

Ces cristaux se forment dans un milieu tectoniquement instable sur la base d'un cristal germe qui se fracture en deux parties à l'instant où les deux parois d'une fissure, sous l'effet de contraintes tectoniques, s'écartent très lentement. Les cristaux à âme ne peuvent se développer que si la rapidité de leur croissance est en équilibre avec la vitesse d'ouverture de la fissure ; en général, par la suite, l'agrégat cristallin se détache de l'un des deux points de fixation. Un ou plusieurs chapelets d'inclusions piégées, reliquats des fluides ayant présidé à la croissance des cristaux, constituent des zones nébuleuses très caractéristiques et sises au centre des agrégats de cristaux, d'où leur nom « d'âme ». Si l'une des parois de la fissure effectue une rotation par rapport à l'autre, le cristal à âme se tord.

Reconnue dans notre étude uniquement dans les carrières de La Sarraz et d'Éclépens, la calcite en cristaux à chapelets d'inclusions (figures 58 à 60) a été découverte il y a une quarantaine d'années par M. Roland Beaud, puis retrouvée plus de vingt ans plus tard lors de notre étude. Si les cristaux de quartz à âme sont bien connus et richement documentés dans la littérature, il n'en est pas de même de la calcite et à notre connaissance, des calcites à âme n'ont pas été mentionnées dans d'autres gisements du Jura suisse, français ou allemand. Ailleurs dans le monde, de la calcite à âme est connue dans les cavités des concrétions calcaires au sein des marnes du Jurassique supérieur de Laragne-Montéglin et d'Upaix, Hautes-Alpes, France (Martin & Beaudet 1996).

Calcite fibreuse et aciculaire

La calcite fibreuse est constituée d'agrégats de minuscules cristaux aciculaires, rappelant l'ouate et ayant un rapport longueur sur largeur de 200 à 300. Elle est aussi communément appelée « soie de montagne » ou « lait de Lune ». On la rencontre comme néoformation récente dans

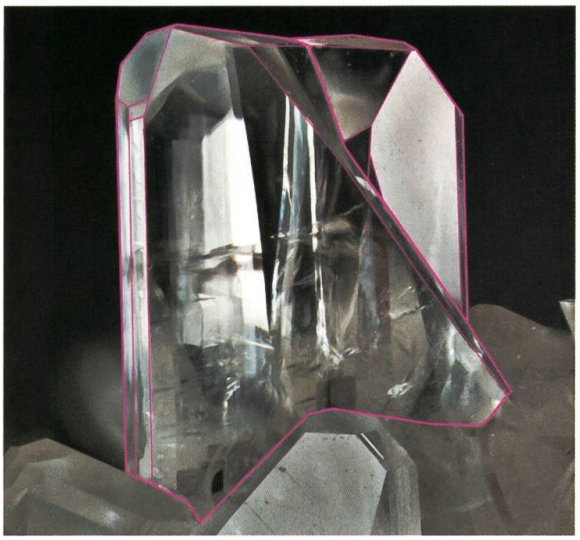

Figure 33. Calcite maclée selon (012), gemme avec des angles rentrants et surlignages des interfaces. La moitié gauche de la macle a partiellement envahi la moitié droite, comme le surligne la ligne grasse vers la droite. Largeur du cristal 3 mm, La Sarraz.

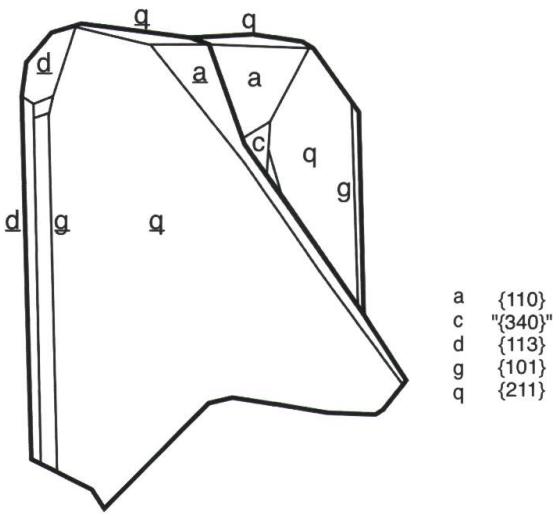

Figure 34. Dessin de la calcite maclée selon (012) illustrée à la figure 33.

Figure 35. Calcite maclée selon (012), gemme et fait rare, sans angles rentrants. Largeur du cristal 4 mm ; La Sarraz.

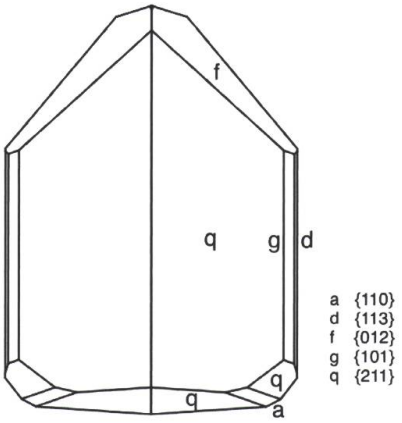

Figure 36. Dessin idéalisé de la macle selon (012) et illustrée à la figure 35.

Figure 37. Groupe de deux individus maclés selon (012) avec surlignages des principales interfaces des surcroissances de seconde génération. Largeur d'image 7 mm, La Sarraz.

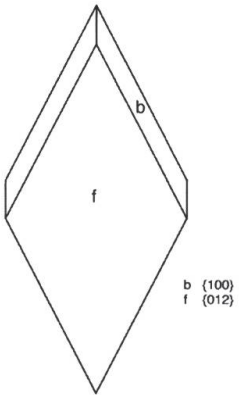

Figure 38. Dessin idéalisé d'un rhomboèdre lancéolé de seconde génération isolé et illustré aux figures 37. Dans cette figuration, les faces latérales du rhomboèdre appartiennent au prisme {100}.

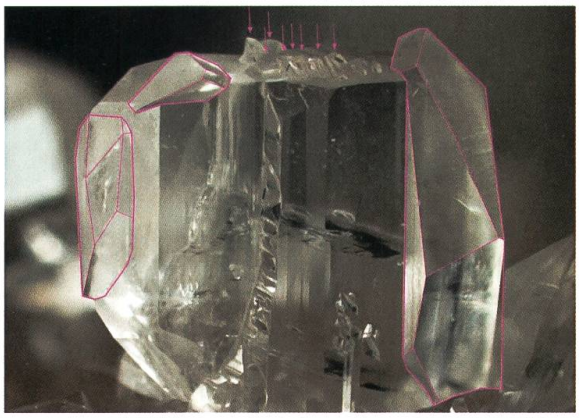

Figure 39. Calcite maclée selon (012) avec surlignages des principales surcroissances inhabituellement grandes. Largeur d'image 4 mm, La Sarraz.

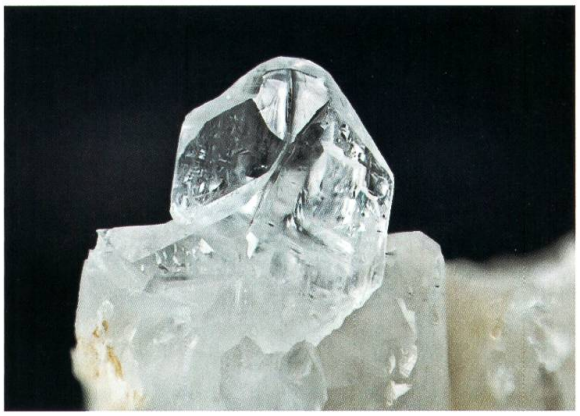

Figure 40. Calcite maclée selon (012), unique par son habitus. Largeur de l'image 6 mm ; La Sarraz.

Figure 41. Calcite maclée selon (012) avec un petit cristal rhomboédrique orangé de sidérite au centre. Longueur du cristal 8 mm ; La Sarraz.

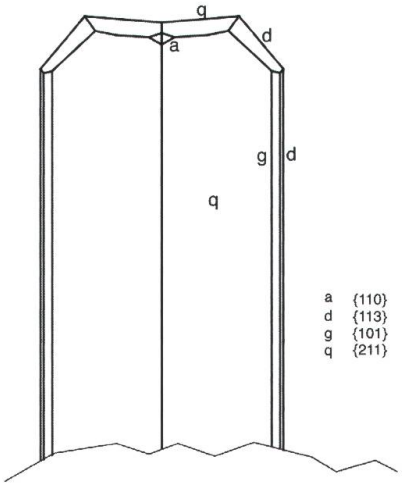

Figure 42. Dessin idéalisé de la macle selon (012) et illustrée à la figure 41.

Figure 43. Calcite maclée selon (012) avec des traces de corrosion bien marquées. Longueur du cristal 5 mm ; La Sarraz.

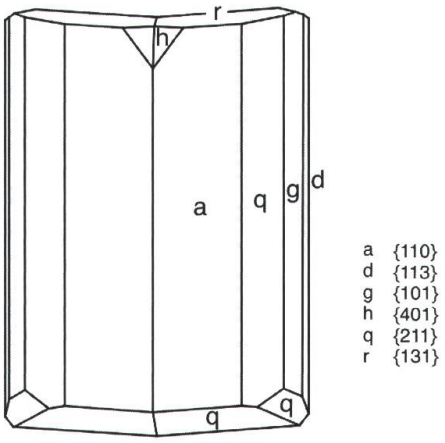

Figure 44. Dessin idéalisé de la macle selon (012) illustrée à la figure 43.

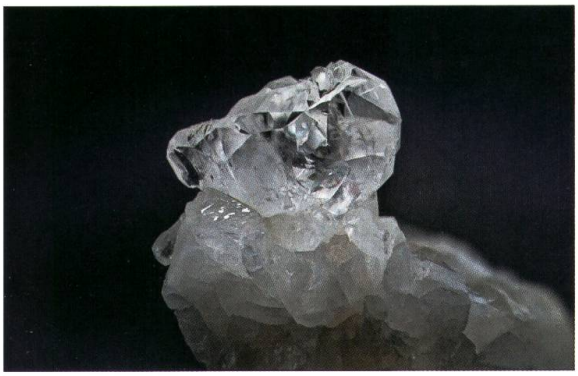

Figure 45. Un exemple caractéristique de dissymétrie d'une macle selon (012): la partie monocristalline gauche représente approximativement ¼ de l'ensemble de la macle alors que la partie monocristalline droite près des ¾. Cet ensemble présente aussi des surcroissances. Largeur du cristal 10 mm; La Sarraz.

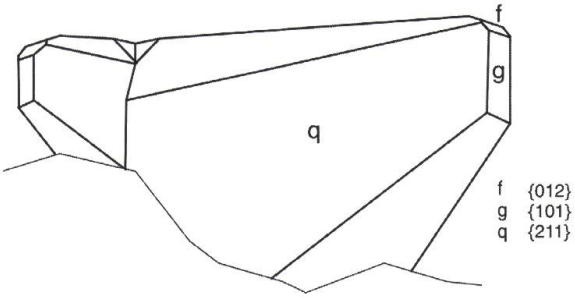

Figure 46. Dessin de la macle fortement dissymétrique selon (012) illustrée à la figure 45.

Figure 47. Calcite maclée selon (012) avec des angles rentrants en gouttière sur toute la longueur du prisme, un phénomène très rarement observé. Longueur du cristal 6 mm; La Sarraz.

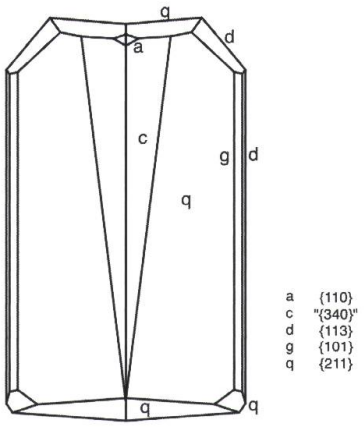

Figure 48. Dessin idéalisé de la macle «en gouttière» selon (012) illustrée à la figure 47.

Figure 49. Calcite maclée «en pagode» selon (012) qui à ce jour n›a été observée que deux fois à La Sarraz. Longueur du cristal 10 mm.

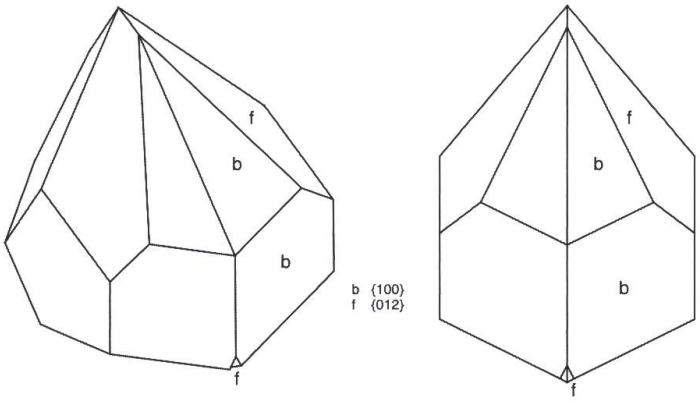

Figure 50. Dessins de la macle «en pagode» selon (012) illustrée à la figure 49.

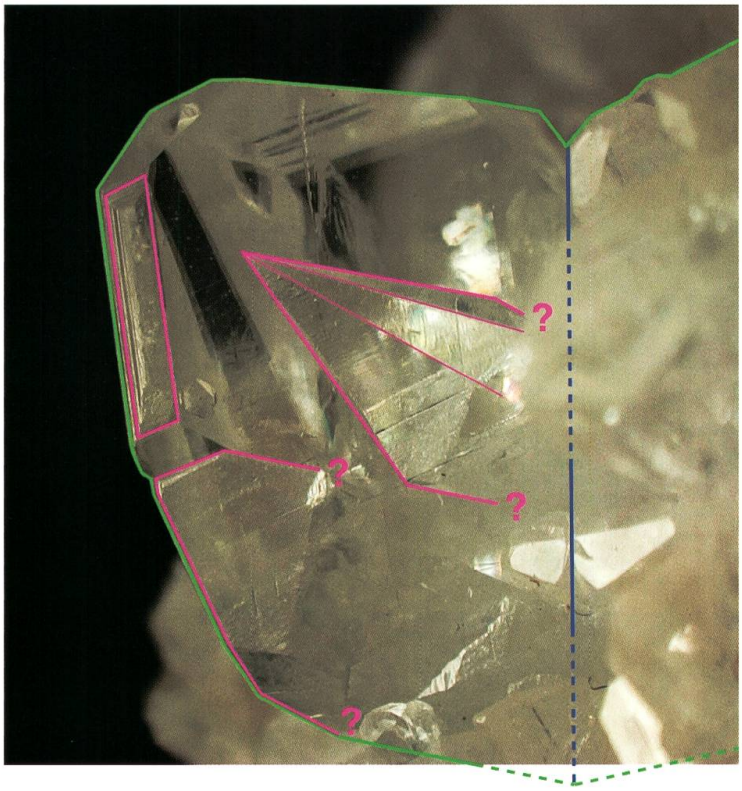

Figure 51. Agrégats de cristaux maclés ou en surcroissance. Le plan de macle est surligné en vert et le plan de macle en bleu. Largeur d›image 11 mm, La Sarraz.

les cavités karstiques (Stoops 1976; Millière *et al.* 2011; Hasinger *et al.* 2015). La calcite fibreuse apparaît sporadiquement en flocons ou en placages entre les graviers des grèzes calcaires des dépôts périglaciaires. Nous avons pu la récolter dans les travaux d'élargissement de la route cantonale entre Vuiteboeuf et Ste-Croix (figure 61) ainsi que dans les Grottes de Vallorbe. La formation de calcite fibreuse pourrait être stimulée indirectement par les microorganismes, conditionnant ainsi la cristallisation ou être directement d'origine microbienne (Bindschedler *et al.* 2014). Dans un contexte génétique différent, signalons aussi la découverte à la carrière de La Sarraz de rares cristaux aciculaires, isolés et distordus (figure 75).

Conclusions

Il est étonnant qu'à notre connaissance la morphologie de la calcite du Jura vaudois n'ait jamais fait l'objet de notes ou de signalements, mêmes ténus, compte tenu de l'incroyable diversité des formes cristallines rencontrées. Il est vrai que l'exploitation intensive de grandes carrières comme celle de La Sarraz et du Mormont à Éclépens est relativement récente. L'accès à des zones profondes, peu ou pas altérées, favorise ainsi la découverte de cristaux aux faces nettes et brillantes, idéales pour des études morphologiques. Les premières mentions minéralogiques dédiées à ces sites datent seulement d'une vingtaine d'années (Andermatt & Meisser 1999).

Si la majorité des nombreux sites étudiés dans le Jura vaudois ne livre que des cristaux aux formes simples et basiques, à savoir des combinaisons de rhomboèdres, de prisme et de scalénoèdres, dans le secteur de La Sarraz et du Mormont à Éclépens, d'autres formes beau-

Figure 52. Calcite maclée selon (012) sans angles rentrants. Longueur du cristal 7 mm ; La Sarraz.

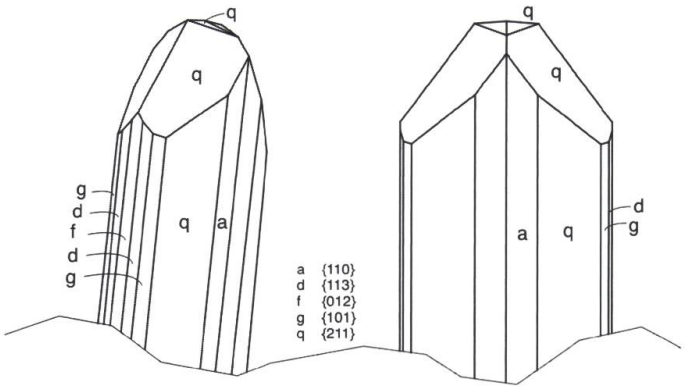

Figure 53. Dessins de la macle selon (012) sans angles rentrants illustrée à la figure 52.

Figure 54. Calcite maclée «en gouttière» selon (012). Le cristal maclé est exceptionnellement biterminé car il a eu une croissance flottante au sein du fluide hydrothermal, il a donc cristallisé sans points d'attaches à sa matrice. Longueur du cristal 10 mm; découverte unique à La Sarraz.

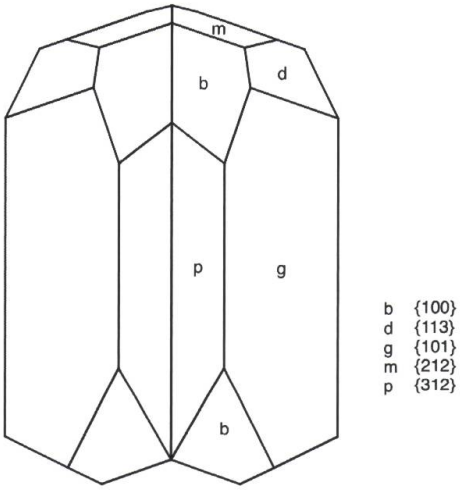

Figure 55. Dessin idéalisé de la macle biterminée selon (012) illustrée à la figure 54.

coup plus complexes ainsi que des macles sont fortement représentées. À l'échelle du Jura suisse, et même à l'échelle mondiale, il s'agit là d'un particularisme local à mettre en exergue. Géologiquement, ces sites se localisent dans un contrefort jurassien, une sorte de boutonnière de horst et de graben s'ouvrant et barrant de son relief les plaines de l'Orbe et de la Venoge. Ainsi les grandes failles NW-SE et les plus petites, perpendiculaires, qui compartimentent ce secteur ont permis une grande circulation de fluides épithermaux. Archivées au Musée cantonal de géologie, les données géologiques du sondage profond (-2'150 m) d'Éclépens-1 réalisé en 1981, montre un gradient géothermique normal à -1'000 m de l'ordre de 3,7 °C/100 m, alors qu'en fond de forage, il s'élève brutalement à près de 8,7 °C/100 m, ceci probablement à cause de la proximité d'une grande faille. Même si les cristallisations au sein même des failles majeures, avec parfois la formation de véritables brèches épithermales, sont rares (Meisser 2008), toutes les fissures et cavités à proximité immédiates sont affectées par ces circulations. Relevons aussi qu'au Moulin Cossaux, au NE de Chamblon, la calcite, recouverte d'oxydes de fer ou de bitume, se présente en rhomboèdres fortement aplatis avec {012} > {101} (figure 13), un habitus rare dans le Jura vaudois. Soulignons également que ce site est très affecté par de

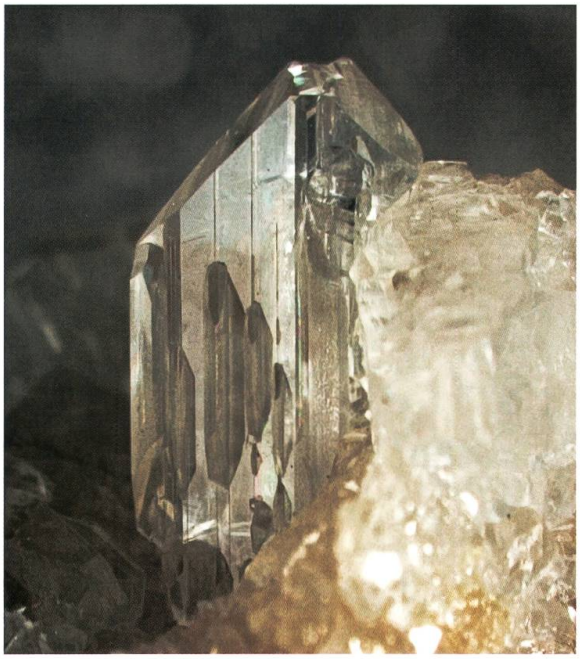

Figure 56. La macle de calcite selon (012), colorée par une mince couche de bitume, montrant des lamelles de maclage mécaniques importantes parallèles au plan de macle, et des surcroissances secondaires développées le long de ces lamelles maclées. Agrégat prismatique de 6 mm ; découverte unique à La Sarraz. Longueur du cristal 6 mm, La Sarraz.

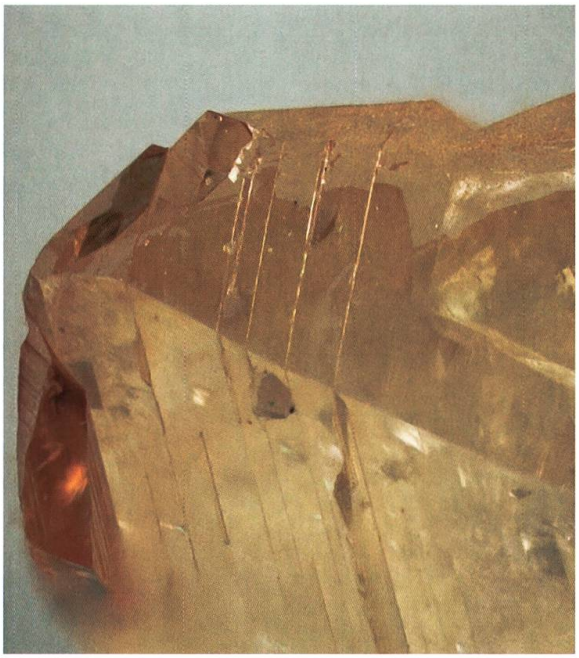

Figure 57. Détail d'une autre macle de calcite selon (012) avec des lamelles mécaniques maclées, montrant que les lamelles ne se limitent pas aux lignes à la surface des faces principales du cristal, mais elles traversent tout le cristal parallèlement au plan de maclage principal. Largeur de l'image 2 mm ; La Sarraz.

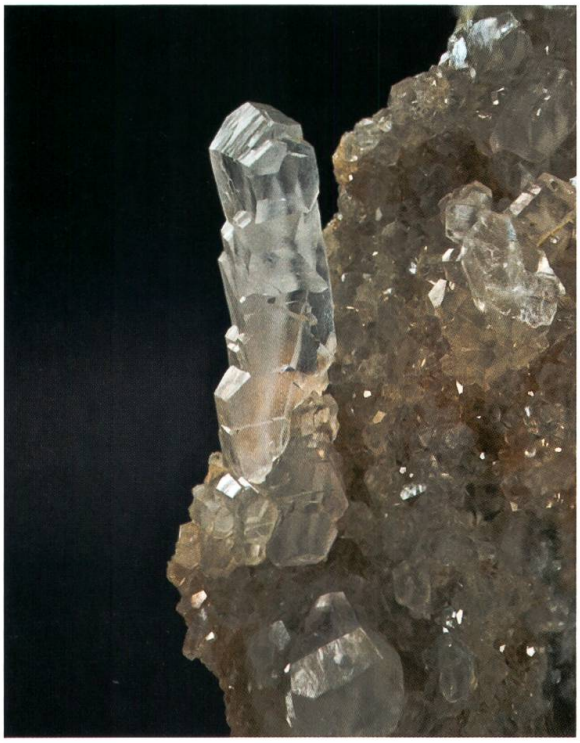

Figure 58. Calcite à «âme». Cristaux de calcite alignés en chapelet avec en leur cœur des voiles nacrés d'inclusions fluides. Longueur de l'agrégat 10 mm ; Éclépens.

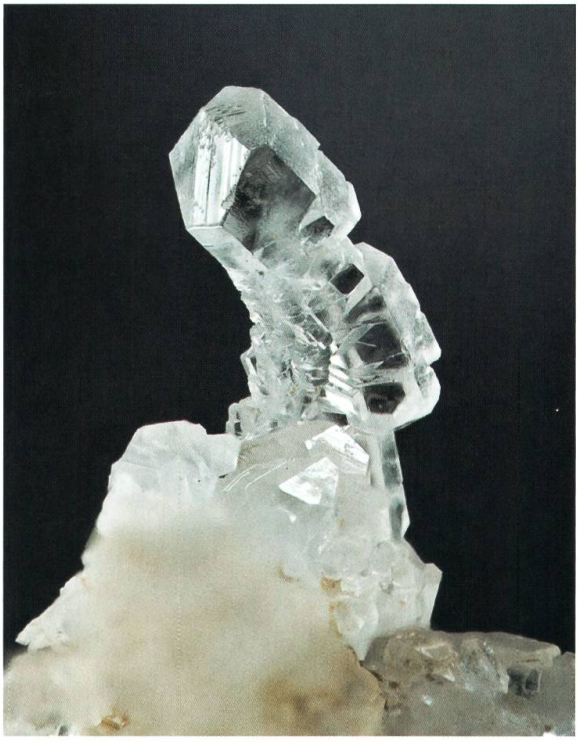

Figure 59. Calcite à «âme» tordue par des contraintes mécaniques. Agrégat de 3 mm ; La Sarraz.

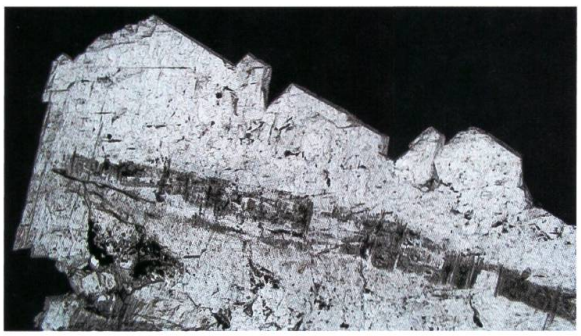

Figure 60. Coupe mince sagittale dans un agrégat de calcite à «âme». Les chapelets d'inclusions fluides apparaissent en gris foncé. Largeur de l'image 5 mm, Éclépens.

Figure 61. Calcite fibreuse photographiée au microscope électronique à balayage. Largeur de l'image 0.23 mm; route cantonale Vuitebœuf - Ste-Croix.

Figure 62. Calcite montrant une double croissance parallèle de deux générations avec un grand et un petit individu au haut de l'image. Vue sommitale perpendiculaire aux faces du prisme. Longueur du cristal 5 mm, Éclépens.

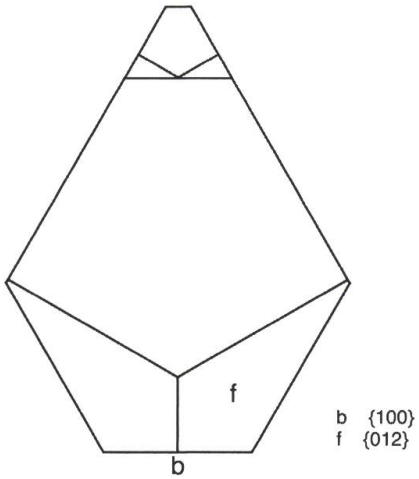

Figure 63. Dessin idéalisé de la double croissance parallèle et illustrée à la figure 62.

Figure 64. Ces cristaux de calcite inhabituels, avec un habitus trigonal en «cornet de glace», présentent étrangement une symétrie réduite. Longueur du cristal principal 4 mm ; Éclépens.

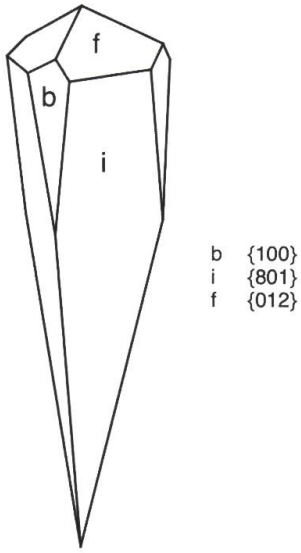

Figure 65. Dessin idéalisé d'un cristal de calcite avec l'habitus trigonal en «cornet de glace» et illustré à la figure 64.

grandes failles sécantes, le long desquelles sourdent plusieurs sources tempérées, atteignant 14 °C, selon Schardt (1898). Ainsi, dans ce dernier cas, le lien avec l'épithermalisme semble très probable.

Comme fluide très fréquemment rencontré dans la grande carrière du Mormont à Éclépens, signalons la présence abondante de bitume visqueux remplissant les cavités à cristaux de calcite au sein des calcaires de l'Urgonien jaune et de la Pierre jaune de Neuchâtel supérieure. Ce mélange d'hydrocarbure peut aussi se retrouver dans les inclusions fluides des cristaux. Il semble évident que la présence de deux liquides immiscibles (bitume et eau) dans les fluides épithermaux a dû avoir une action sur la cristallogenèse de la calcite, en particulier l'apparition de formes ou de surcroissances particulières comme celles, bien visibles dans les figures 68 et 69. En effet, la présence d'hydrocarbures en longues chaines, ramifiées ou non, dans un milieu de cristallisation aqueux ne peut qu'affecter les vitesses de croissance des différentes faces et, au final, changer la forme cristalline en cours de développement.

Toujours en relation avec les zones fortement faillées qui lardent le secteur de La Sarraz et du Mormont à Éclépens, il faut relever que leurs mouvements sont certainement à l'origine de la croissance d'agrégats cristallins de calcite à chapelets d'inclusions (« cristaux à âme »).

Les compositions chimiques, de même que les conditions physiques et thermiques des fluides ayant présidé à la cristallisation de la calcite étudiée dans cet article, ne sont pas connues à ce jour. Les techniques de microthermométrie et de géochimie isotopique, appliquées aux cristaux des fractures et des cavités, pourraient permettre d'appréhender leur genèse.

À l'heure où les prospections et les projets d'exploitation de l'énergie géothermique ciblent les grandes failles du Jura vaudois, l'étude des minéraux peut être une clé de compréhension de tels systèmes hydrothermaux.

Remerciements

Au terme de cet article, nous souhaitons remercier M. Roland Beaud qui nous a légué des minéraux remarquables trouvés dans les années 1970 à la carrière d'Éclépens. Le Laboratoire de microscopie électronique de l'Institut des Sciences de la Terre de l'UNIL (Dr. Pierre Vonlanthen) de même que le laboratoire de diffraction des rayons-X du Musée cantonal de géologie nous ont accordé toutes les facilités nécessaires à l'exécution de nos analyses; qu'ils en soient vivement remerciés. L'entreprise Holcim, propriétaire et exploitante des carrières de La Sarraz et d'Éclépens a grandement facilité notre travail en mettant à disposition des échantillons géologiques. M. le Dr Ulf Thewalt et M. le Prof. Eric P. Verrecchia nous ont éclairés sur les mystères de la calcite fibreuse. Les collectionneurs suivants nous ont mis leur matériel de récolte à disposition pour étude: MM. Gilbert Hermenjat, Gilbert Santa et Gustav Schuler; qu'ils en soient vivement remerciés.

Comme les images sont le pivot de la compréhension de cet article, notre gratitude va évidemment à MM. Thomas Schüpbach, Stefan Ansermet et Gustav Schuler pour la réalisation des clichés en couleur, particulièrement didactiques, de quelques cristaux étudiés. De même, nous remercions chaleureusement le Dr Antoine Pictet qui a réalisé les images des carrières de La Sarraz et d'Éclépens tout en y surimposant les limites des formations stratigraphiques.

Conscient qu'un article, même profondément naturaliste, mais consacré à la cristallographie n'est pas souvent publié dans le Bulletin de la Société vaudoise des Sciences naturelles,

Figure 66. Groupement insolite de cristaux de calcite définissant une «haltère». Cet assemblage étrange résulte de surcroissances de seconde génération. Largeur du cristal 5 mm ; La Sarraz.

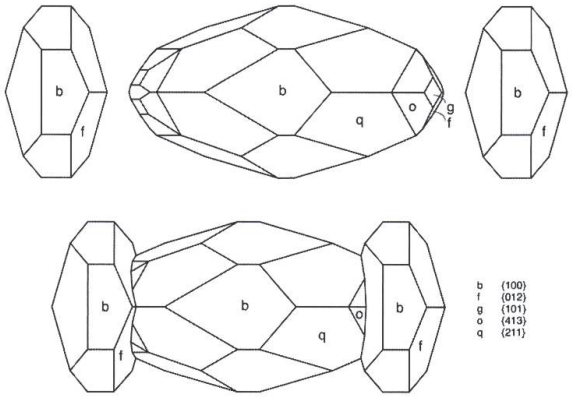

Figure 67. Dessin idéalisé du groupement de cristaux illustré à la figure 66.

Figure 68. Deux générations de calcite développées dans une fracture recoupant du calcaire brun clair (haut de l'image). La calcite de première génération forme un dépôt de cristaux palissadé blanc qui est coloré en brun clair à brun foncé (à gauche) par un fin dépôt de bitume. Une seconde génération blanche, à l'aspect pulvérulent, recouvre en partie des cristaux brun foncé à gauche. Largeur du groupe 9 cm; La Sarraz.

Figure 69. Image détaillée de la figure 68 montrant des scalénoèdres terminés par des rhomboèdres {012}. Ces cristaux sont partiellement revêtus par une surcroissance formant nappage blanc. Largeur des 2 cristaux 3 mm ; La Sarraz.

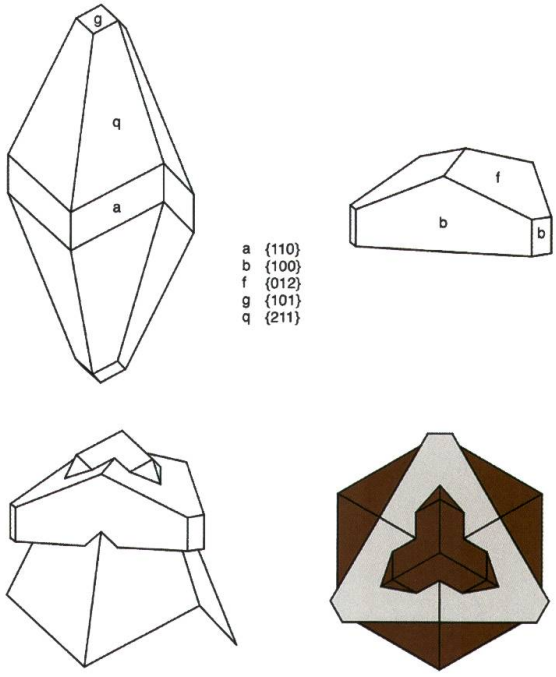

Figure 70. Dessins idéalisés des surcroissances illustrées aux figures 68 et 69.

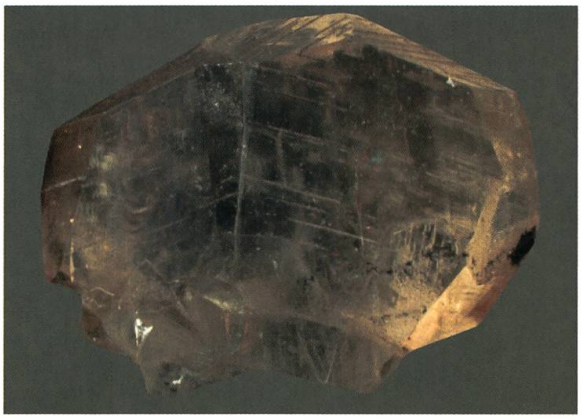

Figure 71. Calcite maclée selon (012). Les traces de clivages sont rendues bin visibles par la corrosion. Largeur du cristal 5 mm ; La Sarraz.

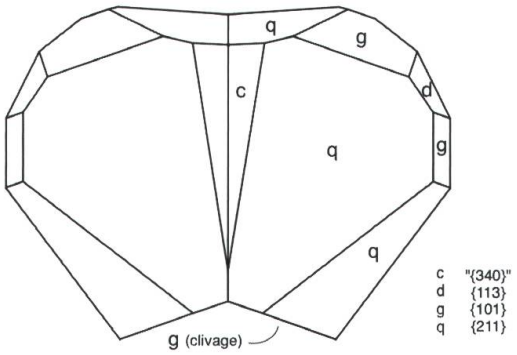

Figure 72. Dessin de la macle selon (012) illustrée a la figure 71. La lettre «g» indique une surface de civage et non une face naturelle.

Figure 73. Calcite rhomboédrique partiellement nappée d'une surcroissance de calcite pulvérulente blanche constituée de cristaux de calcite rhomboédriques de quelques dizaines de microns de dimensions. Longueur du cristal principal de 9 mm ; La Sarraz.

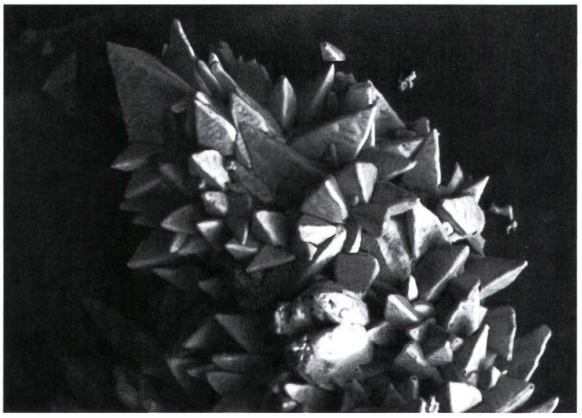

Figure 74. Minuscules cristaux en rhomboèdres aigus constituant la surcroissance blanche pulvérulente illustrée à la figure 73 et photographiés au microscope électronique à balayage. Largeur de l'image 0,3 mm ; La Sarraz.

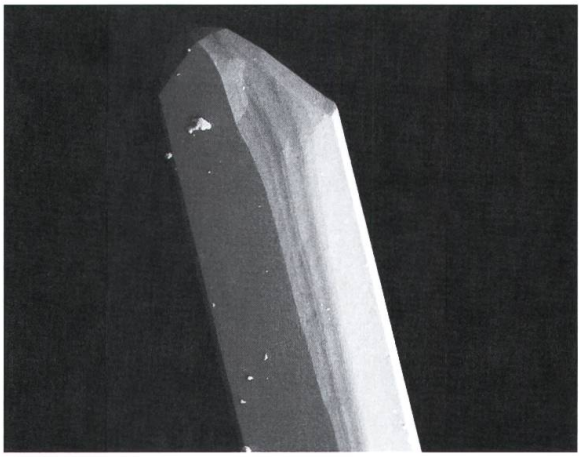

Figure 75. Calcite aciculaire photographiée au microscope électronique à balayage. Le cristal est allongé selon un axe autre que les axes cristallographiques a et c de la calcite. Largeur de l'image 0.45 mm ; La Sarraz.

Figure 76. Prismes et sceptres de calcite gemme en surcroissances de dernière génération sur d'anciens cristaux bitumineux. Cet assemblage rappelle des «créneaux de château». Largeur de l'image 5 mm ; Éclépens.

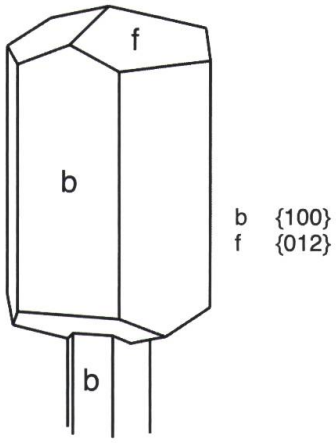

Figure 77. Dessin idéalisé d'un cristal de calcite en forme de sceptre illustré à la figure 76.

nous remercions son rédacteur, M. le Dr Olivier Glaizot, ainsi que le représentant des sciences de la Terre auprès du comité, M. le Dr David Giorgis, d'avoir accepté de le publier.

Enfin, en sa qualité d'expert, M. le Dr Philippe Roth, au travers de sa relecture attentive et de ses remarques pertinentes, a grandement contribué à améliorer la qualité de cet article et d'éviter les écueils propres à cette science ardue qu'est la cristallographie.

Bibliographie

Andermatt P.J., Graf H.W., Meisser N., Graeser S., Richard P.R. & Bussy F., 2008. La morphologie et la couleur des cristaux de céléstine du Jura vaudois. *Bulletin de la Société Vaudoise des Sciences Naturelles* 91 (1): 15-31.

Andermatt P.J. & Meisser N., 1999. Mineralien aus dem Westschweizer Jura. *Lapis* 2: 13-21.

Binschedler S., Caillleau G., Braissant O., Millière L., Job D. & Verrecchia E.P., 2014. Unravelling the enigmatic origin of calcitic nanofibres in soils and caves: purely physicochemical or biogenic processes? *Biogeosciences* 11: 2809-2815.

Brock K.J., 1993a. Minerals of the Rensselaer Stone Company Quarry, Pleasant Ridge, Indiana. *Rocks & Minerals* 61: 111-115.

Brock K.J., 1993b. The crystal forms of Calcite. *Mineralogical Record* 24: 451-470.

De Haller A., 2015. Effingen Member in the Baulmes Quarry (near Orbe, Yverdon): Calcite-celestite veins as indicators of past fluid flow. NAGRA Arbeitsbericht NAB 15-36: 114 pp.

Drugman, J., 1948. Le groupement b1 quadruple de la calcite et son interprétation. *Bulletin de la Société Française de Minéralogie et de cristallographie* 70: 331-336.

Goldschmidt V., 1939. Atlas der Krystallformen. *Carl Winters Universitätsbuchhandlung, Heidelberg*: vol. 2.

Hasinger O., Spangenberg J.E., Millière L., Binschedler S., Caillleau G. & Verrecchia E.P., 2015. Carbon dioxide in scree slope deposits: A pathway from atmosphere to pedogenic carbonate. *Geoderma*, 247-248: 129-139.

Haüy R. J., 1782. Mémoire sur la structure des spaths calcaires. *Journal de Physique* XX: 33-39.

Kreutz St., 1905. Über die Ausbildung der Krystallform bei Zwillingen von Kalkspat. *Tschermaks mineralogische und petrographische Mitteilungen* 24: 323.

Kreutz St., 1909. Einspringende Winkel und Wachstumsgeschwindigkeit an Calcit-Zwillingen. *Tschermaks mineralogische und petrographische Mitteilungen* 28: 490-493.

Lebrun P., Le Cléach J.-M. & Cesbron F. ,1998. Calcite. *Minéraux & Fossiles*, hors-série n° 7.

Martin R. & Beaudet D., 1996. Les concrétions et fentes minéralisées des marnes du Callovien moyen et inférieur situées à l'est de Laragne, Hautes-Alpes, France. *Le Cristallier Suisse*, 10 (11): 428-449.

Maslen E.N., Streltsov V.R. & Streltsova N.R., 1993. X-ray study of the electron density in calcite, $CaCO_3$. *Acta Crystallographica* B 49: 636-641.

Meisser N., 2008., La pyrite de la carrière d'Éclépens VD. Le *Cristallier Suisse* 3: 15-18.

Millière L., Hasinger O., Binschedler S., Caillleau G., Spangenberg J.E. & Verrecchia E.P., 2011. Stable carbon and oxygen isotopes signatures of pedogenic needle fibre calcite. *Geoderma* 161: 74-87.

Nickel E.H., 1995., The definition of a mineral. *Canadian Mineralogist* 33: 689-690.

Palache C., 1943. Calcite, an angle table and critical list. *Harvard University Department of Mineralogy and Petrology publication* 259.

Parker R.L. & Diehl E., 1945. Über Calcitvierlinge von Robat-i-Karim (Iran). *Schweizerische Mineralogische und Petrologische Mitteilungen* 25: 341-348.

Pasero M. ,2019. The New IMA List of Minerals - A Work in Progress - Updated : September 2019. *International Mineralogical Association, Commission on New Minerals, Nomenclature and Classification. http://cnmnc.main.jp/.* Consulté le 3 octobre 2019.

Richards R.P., 1999. The four twin laws of calcite and how to recognize them. *Rocks & Minerals* 74: 308-317.

Rykart R., 1986. Croissance accélérée due au maclage. *Le Cristallier Suisse* 5: 229-238.

Schardt H., 1898. Notice sur l'origine des sources vauclusiennes du Mont-de-Chamblon. *Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles* 26: 211-229.

Stoops G., 1976. On the nature of « lublinite » from Hollanta (Turkey). *American Mineralogist,* 61 (1-2): 172.