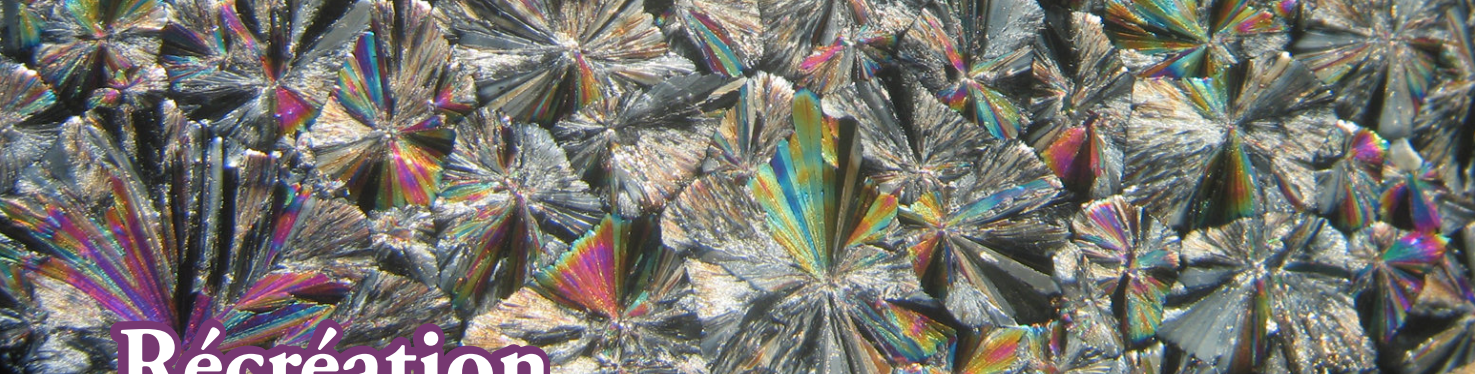




Récréation

DE LA CROISSANCE CRISTALLINE À L'HEURE DE L'APÉRITIF : CELLE QUE L'ON OSE !

Jean-Pierre Gauthier¹ & Ruben Vera²

n° DOI : doi.org/10.63000/G8jpgV226Z4fVJ

Abstract

SWEET GEMS - Even while relaxing, particularly when enjoying an aperitif, it is possible to marvel at the scientific phenomena combining crystal growth and physical optics, observable on crystals of very fine gem quality, although not of interest to jewelry, primarily due to their low hardness and their alteration in the presence of water, but above all intended for a completely different purpose.

Résumé

Même pendant les moments de détente, notamment à l'apéritif, il est possible de s'émerveiller des phénomènes scientifiques alliant la croissance cristalline et l'optique physique, observables sur des cristaux de très belle qualité gemme, bien que n'intéressant pas la joaillerie, en raison tout d'abord de leur faible dureté et de leur altération en présence d'eau, mais surtout voués à une tout autre destination.

¹Centre de Recherches Gemmologiques, 2 rue de la Houssinière, 44332 Nantes cedex, jpk.gauthier@gmail.com

²Centre de Diffractométrie Henri Longchambon, Site CLEA, 5 rue de la Doua, 69100 Villeurbanne, ruben.vera@orange.fr

Image d'illustration de l'article : Sphérulites développées à partir de nombreux germes dans une goutte de solution

Header image: Spherulites developed from numerous nuclei in a drop of solution.

INTRODUCTION

Sur la base d'une expérimentation tous azimuts et éventuellement farfelue, le chercheur scientifique ou amateur se propose souvent d'observer, sans finalité préconçue, des objets inattendus qui, parfois, l'amènent à un résultat étonnant, déroutant ou de belle qualité artistique et le poussent par curiosité à poursuivre ses investigations. C'est ainsi que, dans les domaines de prédilection qui nous motivent - la cristallographie et la gemmologie -, nous avons découvert, à partir d'une solution rose orangé initialement homogène, dont nous dévoilerons la nature par la suite, le très attrayant motif floral représenté en Figure 1.

Cette photographie a été obtenue en déposant une goutte de ladite solution sur une lame de verre, observée entre polariseurs croisés. Lors de l'évaporation du solvant, la sursaturation du soluté a provoqué une croissance radiale progressive des cristaux, de façon centrifuge. Les jointures d'accolement ne sont pas rigoureusement rectilignes, mais les arêtes des faces libres sur le pourtour le sont. Les couleurs de polarisation, caractérisant un matériau anisotrope, sont assez vives, ce qui suggère une faible épaisseur des cristallites.

La qualité artistique de cette photographie réalisée sans but avoué nous a incités à pousser plus avant notre curiosité et à observer au cours du temps cette cristallisation.

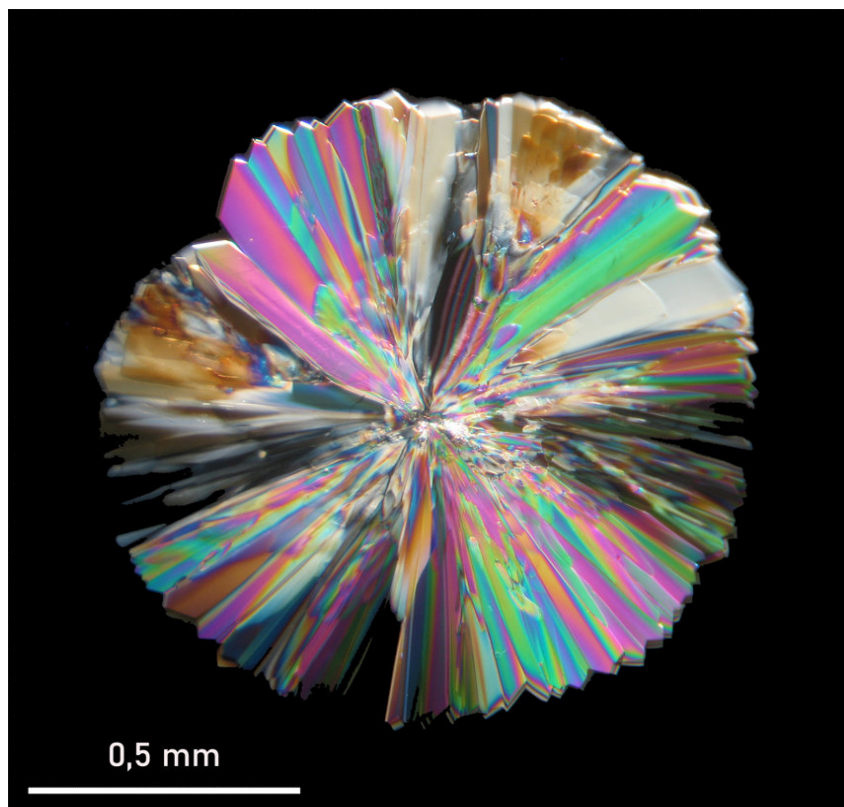


Figure 1 : Croissance radiale de cristaux à partir d'une solution déposée en goutte sur une lame de verre. Éclairage arrière, polariseurs croisés. Photo : J.-P. Gauthier.

Figure 1: Radial growth of crystals from a solution deposited in a drop on a glass slide. Rear lighting, cross polarizers. Photo: J.-P. Gauthier.

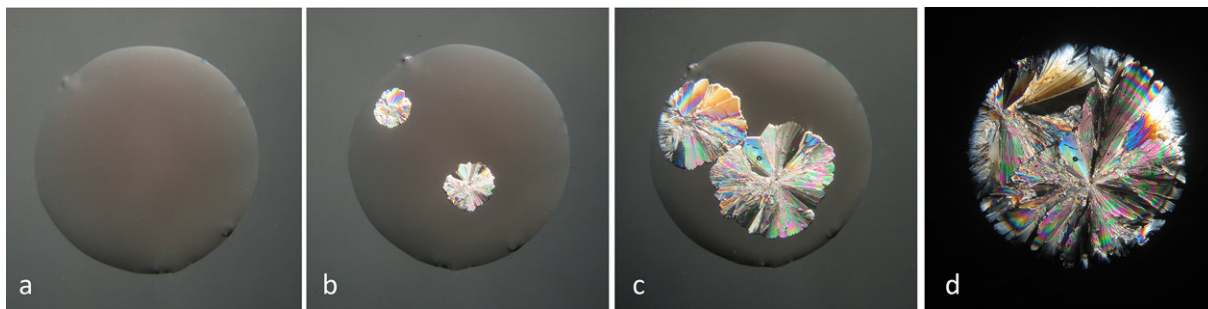


Figure 2 : À partir d'une goutte de solution se développent des cristallites sous forme discoïde à partir de germes généralement peu nombreux. Les prises de vue ont été réalisées, après le dépôt de la goutte, aux temps : a) 22h ; b) 35h ; c) 60h ; d) 108h. Les polariseurs croisés ont été légèrement déréglés pour pouvoir observer le pourtour de la goutte dans les trois premières images. Diamètre de la goutte : 4,8 mm. Photos : J.-P. Gauthier.

Figure 2: From a drop of solution, discoid crystallites develop from generally few seeds. The photographs were taken after the drop was deposited at the following times: a) 22 h; b) 35 h; c) 60 h; d) 108 h. The crossed polarizers were slightly misaligned so that the perimeter of the drop could be observed in the first three images. Drop diameter: 4.8 mm. Photos: J.-P. Gauthier.

PREMIÈRE SÉRIE EXPÉRIMENTALE

Dans un premier temps, trois gouttes de solution ont été déposées avec une seringue sur dix lames de verre. Pour éviter la déformation des gouttes lors des diverses manipulations, les préparations ont été placées dans un four domestique à 50 °C pendant deux heures. À ce stade, la solution devient pâteuse, la goutte s'aplatit et ne coule plus, mais ne rétablit pas la lumière entre polariseurs croisés.

Il a fallu encore de nombreuses heures pour commencer à apercevoir quelques germes disséminés dans la goutte de solution. Progressivement, la cristallisation s'est étoffée au cours du temps sous forme de disques à croissance radiale. Plusieurs jours ont été nécessaires pour une cristallisation complète de chaque goutte. La Figure 2 donne un exemple du développement des cristaux jusqu'à la phase finale stabilisée. Les temps de début et de fin de cristallisation peuvent varier de plusieurs heures entre les différentes gouttes.

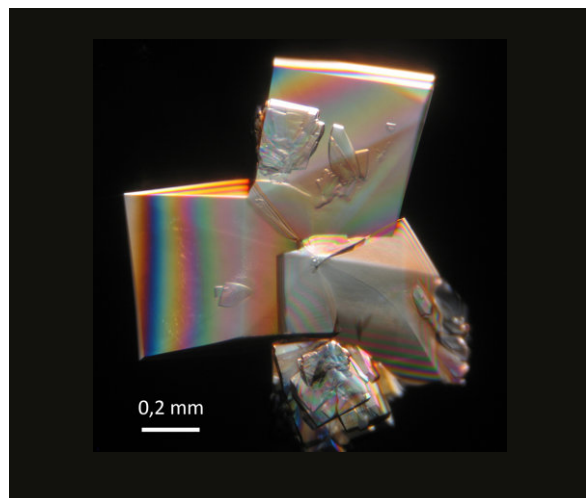


Figure 3 : Cristal en « coin », présentant des franges de polarisation d'égale épaisseur, dont la couleur est de plus en plus « lavée de blanc » au fur et à mesure que celle-ci augmente. Photo : J.-P. Gauthier.

Figure 3: Fringes of polarization of equal thickness, the color of which is more and more polychromatic as it increases. Photo: J.-P. Gauthier.

L'opération a été renouvelée, de sorte que nous disposons de soixante dépôts. Pratiquement tous ont reproduit cette croissance sphérulitique lente à partir de rares germes dans chaque goutte. À l'exception d'un seul, ayant donné des cristaux de forme différente, peut-être dus à une goutte en dôme plus élevé, permettant une croissance tridimensionnelle (Figure 3) et de quelques autres où les germes ont été beaucoup plus nombreux (Figure d'en-tête de l'article).

UN PEU D'OPTIQUE CRISTALLINE : LES TEINTES DE POLARISATION

Ces figures de cristallisation, obtenues entre polariseurs croisés, sont remarquables à divers points de vue. Tout d'abord en raison de la pureté des cristallites, de qualité gemme, sans aucune inclusion solide, avec des facettes très nettes aux arêtes saillantes. Également par les effets optiques : les franges de polarisation d'égale épaisseur, aux couleurs vives près des arêtes, palissent

progressivement : elles sont « lavées de blanc », selon l'expression consacrée, lorsque l'épaisseur augmente. En cela, elles suivent les teintes de polarisation de Newton (charte de Lévy & Lacroix, 1888), permettant de déterminer en fonction de la couleur soit la valeur approximative de la biréfringence si l'on connaît l'épaisseur, soit l'épaisseur si l'on connaît l'amplitude de la biréfringence. Sur la Figure 3, le cristal de gauche en biseau illustre parfaitement la succession des teintes de Newton à partir de l'arête vive.

Les motifs floraux des figures discoïdes présentent souvent des « pétales » en forme de larmes de cristal de lustre ancien, ou encore mieux, en forme de cravates ! (Figure 4). Au cours de la croissance, leur forme divergente à partir du centre est naturellement due au fait que plus on s'éloigne de celui-ci, plus l'espace offert s'agrandit. Les valeurs angulaires des pointes centrales des cristaux sont sensiblement les mêmes, mais surtout, conformément à la loi de Romé de Lisle, les faces libres se coupent sous des angles identiques, aux extrémités des « cravates ». La couleur de ces cristaux est liée à leur épaisseur, mais aussi à leur position angulaire par rapport aux polariseurs croisés, avec des extinctions à 90° les uns des autres. Ici la couleur de chaque cravate évolue peu du centre vers les bords, attestant d'un profil presque plat de la « cravate ».

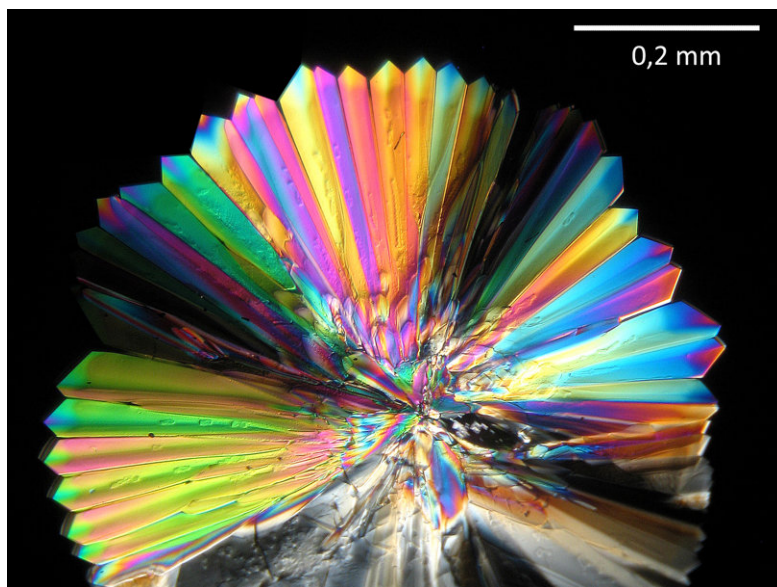


Figure 4 : « Choisissez votre cravate ». Noter la similarité des différents cristaux à croissance centrifuge et les extinctions à 90° les uns des autres. Photo : J.-P. Gauthier.

Figure 4: "Choose your tie". Note the similarity among the various radially-grown crystals and the extinctions every 90 degrees. Photo: J.-P. Gauthier.

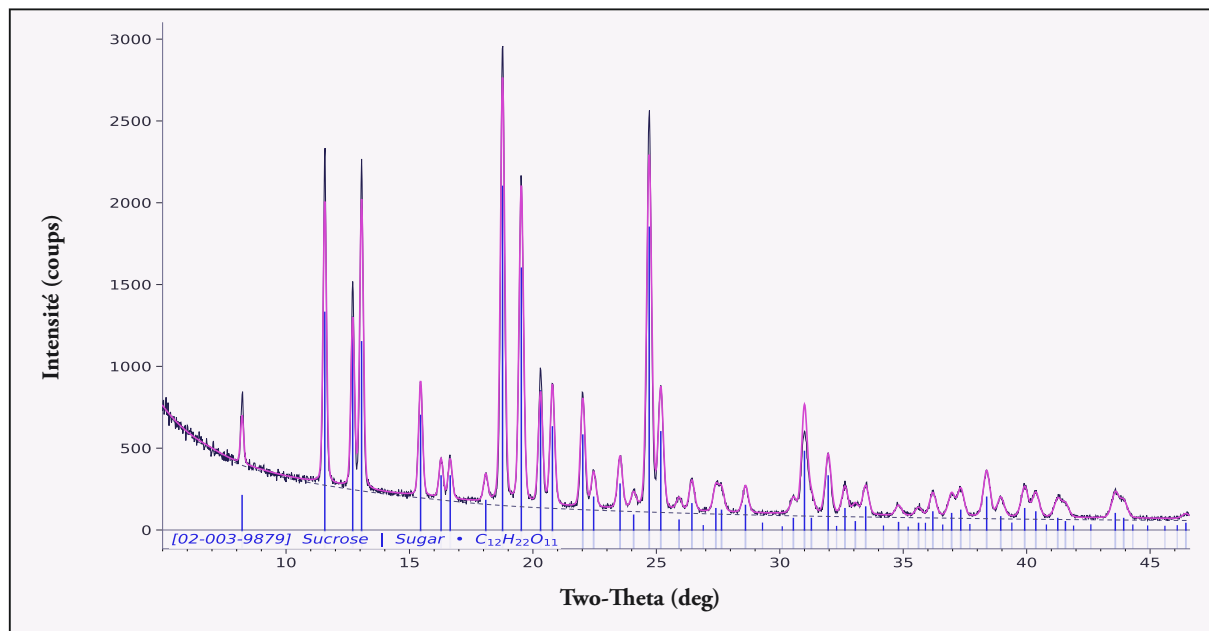


Figure 5 : Diffractogramme X effectué sur les cristaux de saccharose. Les raies théoriques correspondent parfaitement aux pics de diffraction X. Réalisation : R. Vera.

Figure 5: X-ray diffractogram performed on crystallites formed from the solution. The theoretical lines for sucrose correspond perfectly to the X-ray diffraction peaks. By R. Vera.

NATURE DE LA SOLUTION

Durant l'évaporation totale du liquide de la solution, les germes se développent selon des rosaces emprisonnées dans la goutte initiale, formant ce qu'on pourrait désigner malicieusement par « un sac à roses ».

Car c'est bien de saccharose (ou sucrose) dont il s'agit, et ceci sans surprise, étant donné la solution initiale. L'identification a été réalisée sur un diffractomètre à poudres Bruker D8-Advance à détecteur linéaire lynxeye-XET à dispersion d'énergie, au Centre de Diffractométrie -Site CLEA) à Villeurbanne. Le diffractogramme de la Figure 5 confirme la nature des molécules composant ces cristaux : c'est du sucre, de composition $C_{12}H_{22}O_{11}$. Il est constitué de deux unités : glucose et fructose.

Il est temps maintenant d'indiquer quel était le produit de départ : La solution dans laquelle ont poussé ces cristaux provient d'un composant du célèbre apéritif d'origine italienne, le « spritz », que les Vénitiens sirotent sur les placettes à l'écart de la marée touristique, composé de prosecco, d'eau gazeuse et d'un composant apéritif commercial, anagramme de PAROLE.

C'est ce dernier qui a été utilisé, se révélant propice à une croissance lente, caractérisée par le grossissement progressif des cristaux, à partir de germes isolés, la plupart du temps peu nombreux, éloignés les uns des autres et se rejoignant en fin de cristallisation.

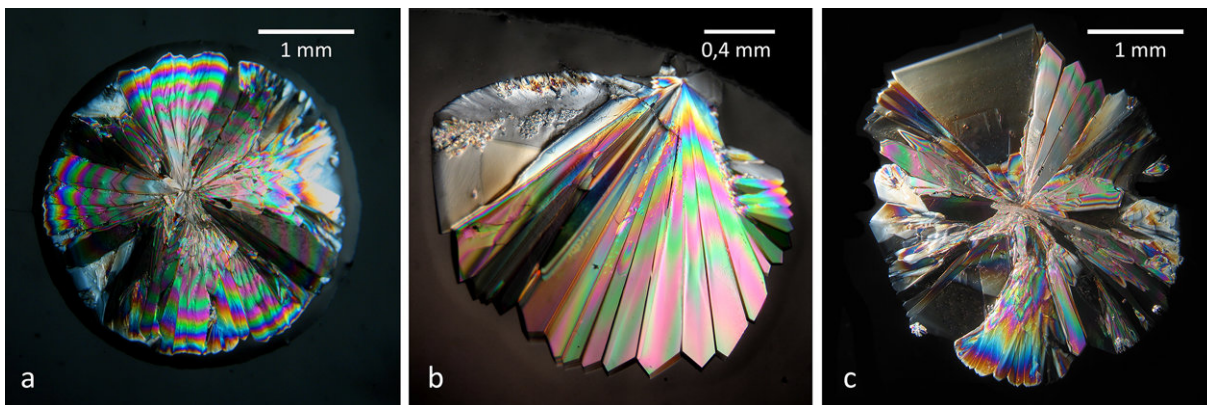


Figure 6 : Développement à partir d'un germe unique : a) sous forme de ventilateur ($\varnothing=3$ mm) ; b) en éventail ($\varnothing=2,2$ mm) ; c) développement selon un secteur angulaire plus large d'un des cristaux de la sphérulite ($\varnothing=3$ mm). Photos : J.-P. Gauthier.

Figure 6: Growth from a single seed crystal: a) in a fan-like shape ($\varnothing=3$ mm); b) in a scallop shell ($\varnothing=2.2$ mm); c) growth over a wider angular sector of one of the spherulite crystals ($\varnothing=3$ mm). Photos: J.-P. Gauthier.

DEUXIÈME SÉRIE EXPÉRIMENTALE

Poursuivant cette amusante expérimentation, nous avons déposé à la seringue des gouttes plus petites sur une série de 12 lames de verre comportant 3 gouttes chacune. L'heure n'étant pas propice à surveiller un four, nous n'avons pas chauffé préalablement les échantillons à 50 °C. L'évaporation a été moindre et surtout les gouttes ne se sont pas aplaties avant cristallisation.

Sur l'ensemble, 17 gouttes ne comportaient qu'une sphérulite, développée à partir d'un germe central, ayant l'allure d'un ventilateur (Figure 6a) ou d'un germe latéral, prenant l'aspect d'éventail ou de coquille Saint-Jacques (Figure 6b). Dans quelques cas, un cristal s'est développé angulairement plus que les autres et présentait un plat en périphérie (Figure 6c).

D'autres aspects marquent la différence avec les gouttes préalablement chauffées.

Il peut y avoir un empilement de cravates dans la hauteur, ou un recouvrement partiel les unes sur les autres, à la manière d'un jeu de cartes tenu en main, et non plus côte à côte. Contrairement aux cravates plates de la goutte chauffée, les cristaux changent rapidement d'épaisseur du centre vers les bords, comme le montrent les franges concentriques, avec des couleurs de polarisation vives au bord de la goutte, et une rapide montée dans les ordres supérieurs des teintes de Newton vers le centre (Figure 6a). Parfois même, ils sont épais jusqu'au bord de la goutte, avec des teintes très pâles, caractérisant une plus grande épaisseur. Tout cela montre que la goutte reste bombée pendant une bonne partie de la cristallisation, offrant aussi un développement vers le haut. Cependant, la croissance reste de type sphérulitique et ne conduit pas à des cristaux massifs tels que ceux obtenus dans un espace libre tridimensionnel.

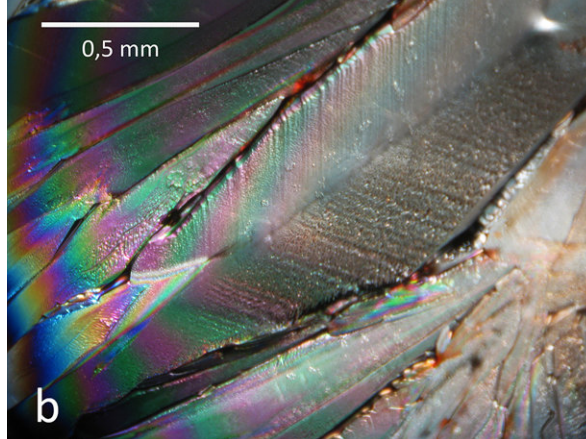
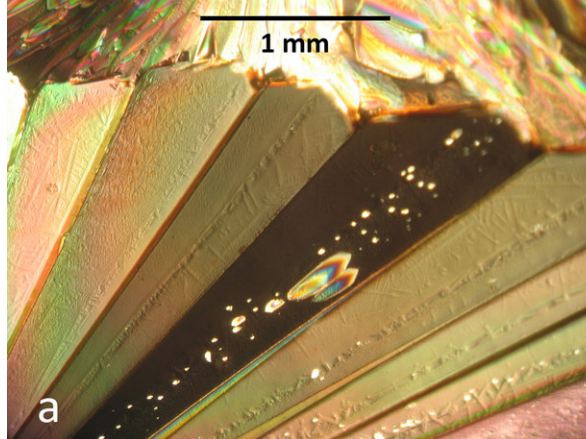


Figure 7 : a) Les cristaux en forme de cravates présentent souvent une ligne médiane, pouvant être décorée par des cristaux négatifs, comme le montre la cravate en position d'extinction. Parfois plus larges, ces cristaux négatifs très minces, irisés, adoptent la forme et l'orientation de la cravate. b) Deux ensembles de stries parallèles montrant les étapes du front de croissance se rejoignent en « V » sur la ligne médiane. Photos : J.-P. Gauthier.

Figure 7: a) Tie-shaped crystals often feature a central line, which may be adorned at the end of growth by negative crystals, as shown by the tie in the extinction position. Sometimes wider, these very thin, iridescent negative crystals take on the shape and orientation of the tie. b) Two sets of parallel striations showing the stages of the growth front converge in a "V" shape at the midline. Photos: J.-P. Gauthier.

UN PEU DE CRISTALLOGRAPHIE

Figures de cristallisation

Dans la grande majorité des cas, on remarque que la cravate présente dans sa grande longueur une ligne de démarcation médiane partant du centre et rejoignant le point de rencontre des deux bords externes. Cette démarcation peut comporter des défauts et peut présenter des cristaux négatifs très petits, également en forme de cravate, et montrant des franges irisées, signes d'une très faible épaisseur. Ces cristaux négatifs s'observent aussi en dehors de la ligne médiane (Figure 7a). Dans certains cas, cette « suture » marque la ligne de démarcation entre deux fronts de croissance en « V », soulignés par deux ensembles de stries parallèles (Figure 7b), analogues à celles que l'on peut observer dans de l'émeraude synthétique par méthode hydrothermale. L'angle mesuré entre ces deux directions est de l'ordre de 105°.

Par ailleurs, il n'est pas rare de voir à la surface des cristaux des formations dendritiques, comme sur la Figure 8. Nous avons également observé des inclusions fluides et des réseaux de fissures décorées par des bulles d'air, notamment dans la troisième série d'expériences.



Figure 8 : Dendrites en surface de cristaux. Photo : J.-P. Gauthier.

Figure 8: Dendritic growth on the crystal surface. Photo: J.-P. Gauthier.

La croissance du saccharose

La Figure 9 montre les huit plans principaux de croissance d'un cristal de saccharose ayant poussé en volume, référencés traditionnellement par les lettres a, c, d, o, p, p', q, r accompagnées ici par leur correspondance indicielle selon la notation de Miller. Cependant, cette forme subit des variations en présence d'impuretés, ou d'un autre mono- ou polysaccharide, comme le montrent divers auteurs (ex : Sgualdino *et al.*, 2000 ; Belhamri, 2004), ou encore selon la température. Dans des espaces confinés, la forme peut être, comme nous l'avons vu, très différente.

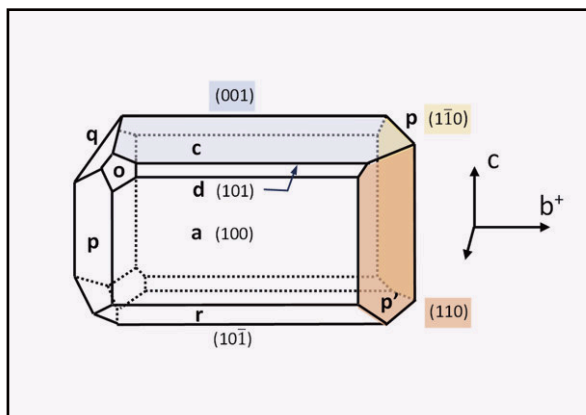


Figure 9 : Plans de croissance d'un cristal de saccharose. Les axes b et c sont contenus dans le plan de la figure. Le signe + marque le sens de croissance rapide dans la direction b⁺.

Figure 9: Growth planes of a sucrose crystal. The b and c axes lie within the plane of the sketch. The + sign indicates the direction of rapid growth along the b⁺ axis.

Le saccharose cristallise dans le système monoclinique P2₁. Il a trois indices de réfraction principaux : $n_{\alpha} \approx 1,537$, $n_{\beta} \approx 1,565$ (selon l'axe b) et $n_{\gamma} \approx 1,570$. Il est doué d'un pouvoir rotatoire dextrogyre, de 30-31° par mm d'épaisseur. Son axe b est un axe de symétrie hélicoïdal. C'est un axe de croissance rapide et c'est l'un des axes de l'ellipsoïde des indices. À ce titre, une extinction entre polariseurs croisés est obtenue lorsque l'axe b du cristal est parallèle à l'un des polariseurs.

Axe de croissance radiale et bords libres des cristaux

Il est donc probable que l'axe de la cravate soit l'axe b, donc [010] : Lorsqu'on tourne progressivement la préparation, chaque cravate présente une extinction « droite », lorsque son axe est parallèle à l'un des polariseurs. Si l'on se réfère aux plans de croissance les plus fréquents du saccharose, l'angle obtus entre les bords extérieurs de la cravate correspondrait aux plans (110) et ($\bar{1}\bar{1}0$). Les arêtes correspondantes dans le plan (001) seraient donc notées [110] et [$\bar{1}\bar{1}0$]. L'angle théorique est de 102,6°, mais sa mesure sur photo varie légèrement, autour de 95°, soit en raison d'un front de croissance par marches, soit en raison d'un léger basculement des cristaux sur la lame de verre, qui reposent en principe sur le plan (001), mais qui peut être aussi un plan vicinal³ de celui-ci (d'autres considérations peuvent également expliquer cet écart⁴). Mais les stries d'accroissement à environ 105°, peu éloigné de 102,6°, témoignent de la progression synchrone des faces du prisme {110} de part et d'autre de l'axe de suture b.

³Un plan vicinal est, comme son nom l'indique, voisin d'un plan cristallographique généralement de faibles indices de Miller et de forte densité mais, en raison d'une croissance en escaliers du cristal, le plan moyen s'en écarte plus ou moins légèrement.

⁴Selon les observations de Vavrinecz (1965), rapportées par de nombreux auteurs (ex : Vanhook, 1969), l'habitus monoclinique du saccharose en milieu aqueux présente des variations angulaires significatives par rapport aux calculs de réseau. L'angle entre les faces du prisme {110}, mesuré à 95° dans nos conditions expérimentales, s'écarte de la valeur théorique de 102,6°. Cet écart est attribué à l'énergie d'interface spécifique entre l'eau et les faces du prisme, qui favorise une morphologie plus allongée selon l'axe b.

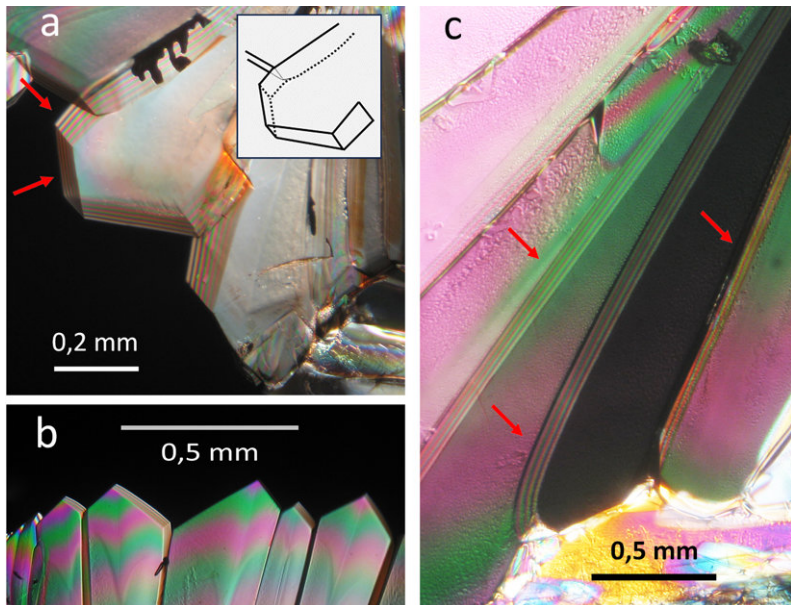


Figure 10 : Bords des cristaux : a) Les faces fléchées sont rentrantes, les autres saillantes ; b) Dissymétrie de leur longueur ; c) Franges de coin dans les zones latérales d'accolement de cristaux voisins (flèches rouges). Photos : J.-P. Gauthier.

Figure 10: Crystal edges: a) The faces marked with arrows are recessed; the others are protruding. b) Asymmetry in their lengths. Edge fringes in the lateral contact zones of adjacent crystals (red arrows). Photos: J.-P. Gauthier.

L'utilisation d'une lame quart d'onde a montré que l'axe de la cravate était un axe lent⁵, et donc que le cristal était plutôt couché sur un plan contenant l'axe rapide correspondant à l'indice le plus faible, soit (001) ou un plan voisin. Notons que la vitesse de croissance selon l'axe b^+ est plus grande que selon l'axe b^- (Döhl & Follner, 1992), ce qui entraîne que le bout de la cravate serait représenté par le plan supérieur (gris-bleu) dans le modèle de la Figure 9, avec les faces libres de droite (prisme jaune et orange), et avec un évasement progressif vers la droite des bords latéraux, lors de la croissance sphérulitique.

En raison de l'inclinaison de l'axe c par rapport au plan (001) ($\beta \approx 103^\circ$), les plans (110) et ($\bar{1}\bar{1}0$) ne sont pas perpendiculaires à celui-ci. Ils font un angle de $81,7^\circ$ et $98,3^\circ$, respectivement. De sorte que l'un rentre sous la cravate, et l'autre déborde. Cela se voit bien au microscope binoculaire, mais difficilement sur une photo (Figure 10a). Le schéma associé rend compte de cette dissymétrie en front de cravate, avec, en pointillé, les faces rentrantes. Les bords eux-mêmes n'ont pas la même longueur (Figure 10b).

Cette dissymétrie existe aussi sur les bords latéraux des cravates, de sorte que la jonction entre elles est inclinée, formant deux biseaux inversés l'un par rapport à l'autre. Ils sont généralement séparés par une très mince lame de liquide coloré. La zone d'accolement est visible grâce aux franges d'interférences (Figure 10c).

Absence de macle dans l'ensemble des cristaux formant une sphérulite

Il était concevable de se demander si toutes les cravates résultaient du même processus de formation, seulement déviées d'un petit angle de l'une à la voisine, ou si une autre orientation, donnant la même forme pouvait exister dans ce carrousel, voire dans une même cravate. Et bien sûr, on pense à la macle.

Les deux macles connues classiques dans le saccharose sont, en l'absence de plan de symétrie, des macles par rotation de 180° , soit autour de [100], soit autour de [001]. Dans les deux cas, un cristal maclé contiendrait l'axe b , et donc, si l'on amène l'axe de la cravate dans l'une des directions

⁵Entre polariseurs croisés, l'axe lent correspond à l'indice de réfraction n le plus élevé, associé à une vitesse de la lumière plus faible que selon l'axe rapide. À ne pas confondre avec les vitesses de croissance.

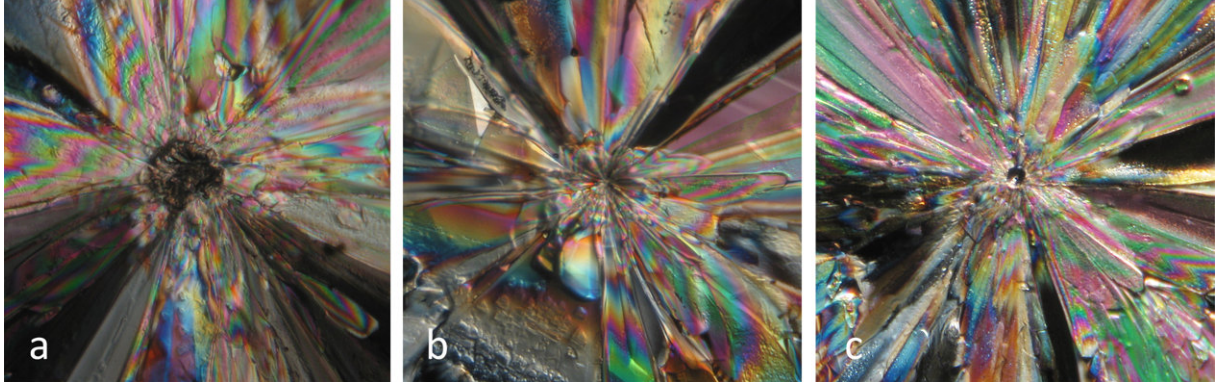


Figure 11 : Détail du centre des sphérulites : a) amas de cristallites ; b) germe invisible ; c) bulle d'air. Largeur de champ : 1 mm pour chaque photo. J.-P. Gauthier.

Figure 11: Close-up of the center of the spherulites: a) cluster of crystallites; b) invisible nucleus; c) air bubble. Field of view: 1 mm for each photo. J.-P. Gauthier.

des polariseurs croisés, les deux parties du cristal doivent s'éteindre. S'il y a une macule, un test par introduction d'une lame quart d'onde permet de rétablir la lumière en conférant des teintes différentes aux deux parties du cristal. Dans notre cas, une cravate reste entièrement de la même couleur lorsqu'on introduit la lame quart d'onde.

Entre deux cravates voisines, le test est le même. En plaçant leur limite de séparation selon l'axe d'un des polariseurs, les deux parties ne sont plus noires mais grises. L'introduction d'un quart d'onde devrait modifier différemment leur teinte si deux cristaux étaient d'orientation différente. Il n'en est rien. Une autre considération vient à l'appui de cette constatation : s'il y avait retournement de l'axe b pour certaines cravates, elles n'auraient pas toutes la même longueur, puisque la vitesse de croissance est plus importante dans la direction b^+ que dans la direction b^- .

Enfin, on peut imaginer une rotation de 180° autour de l'axe b. Dans ce cas, la longueur de la cravate « jumelle » serait de longueur similaire (les axes de croissance rapide pointant tous deux vers l'extérieur), la direction verticale serait la même et donc le trajet optique identique. Cependant, la

dissymétrie par retournement peut exister, puisque le plan médian vertical, perpendiculaire à (001) n'est pas un plan de symétrie. Il est à remarquer que les bords externes de cravate ne sont pas de même longueur, et que la petite longueur, par exemple, n'est pas toujours du même côté (Figure 10b). Il est cependant difficile de conclure sur l'existence possible de « deux côtés de la cravate » sans une expérimentation beaucoup plus poussée.

Le germe

L'organisation en secteurs angulaires de faible amplitude débute alors que le germe est encore petit. Celui-ci peut avoir l'aspect d'un petit amas non organisé apparaissant sombre entre polariseurs croisés (Figure 11a), mais souvent il n'est pas visible au microscope optique et la distribution en secteurs angulaires semble provenir d'un point unique (Figure 11b). Parfois la cristallisation commence sur une bulle d'air coincée dans la goutte sirupeuse (Figure 11c). La compétition entre cristaux voisins est féroce, et l'immense majorité des cristaux n'occupent qu'un espace angulaire de quelques degrés. Quelquefois, l'un d'entre eux arrive à s'attribuer une plus large part du gâteau (Figure 6c).

CONFINEMENT DE LA GOUTTE DE SOLUTION

Au regard de cette croissance développée essentiellement dans le plan horizontal, il a paru intéressant de contraindre encore plus l'épaisseur de solution en apposant sur la goutte une lamelle de verre pour se rapprocher d'une croissance bidimensionnelle. L'évaporation de l'eau se faisant par les bords de la lamelle, on doit s'attendre à une cristallisation progressive centripète, et non plus centrifuge.

Formes de cristallisation

Six lames de verre ont reçu chacune une goutte de solution, sur laquelle a été déposée une lamelle de

verre fine, circulaire. Les cristaux de sucre ont effectivement commencé à apparaître sur le bord de la lamelle, et ont continué à se développer très lentement vers l'intérieur. La cristallisation n'a plus progressé entre 15 et 30 jours après le début de l'expérimentation. Elle s'arrête faute de nutriment dans les zones d'où ont migré les molécules de saccharose pour enrichir les cristaux en formation (Figure 12a).

Sur les six lames, quatre ont montré des cristaux ayant une forme géométrique, principalement rectangulaire, attestant de la croissance selon l'axe b (Figure 12b). Deux autres lames présentaient une cristallisation en fougères (Figure 12c).

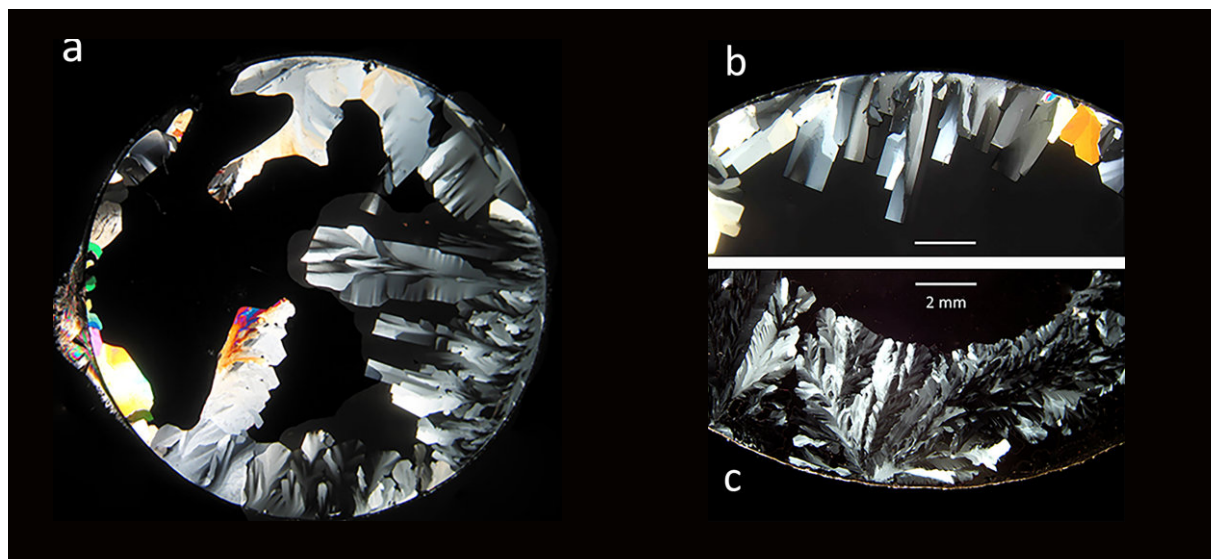


Figure 12 : a) En plaçant une goutte de solution entre deux plaques de verre, la cristallisation débute sur les bords de la lamelle circulaire (de diamètre 15 mm) et se propage vers l'intérieur, en laissant des vides, faute de nutriment. Elle prend deux aspects apparemment très différents : b) elle adopte une forme géométrique ou c) ressemble à de la fougère. Photos : J.-P. Gauthier.

Figure 12: When a drop of solution is placed between two glass slides, crystallization begins at the edges of the circular droplet (15 mm in diameter) and spreads inward, leaving gaps due to a lack of nutrients. It takes on two seemingly very different forms: b) a geometric shape and c) a fern-like pattern. Photos: J.-P. Gauthier.

Cette différence paraissait importante, mais il n'y a en fait pas de contradiction. La Figure 13a, correspondant à une fin de cristallisation, montre une croissance monocristalline en lumière polarisée non analysée, avec des formes nettement rectangulaires. Sur les bords du cristal, on aperçoit des restes du liquide comportant un colorant rose orangé, limité par des bulles d'air. Au sein du cristal, des « cristaux négatifs bidimensionnels » soulignent des lacunes de croissance (flèches). Mais en lumière polarisée et analysée, l'aspect est très nettement différent, avec une structure apparente en fougères (Figure 13b).

Les cristaux sont très minces puisque, entre polariseurs croisés, on a seulement des gris ou du blanc, correspondant au début de l'échelle des teintes de Newton. Dans un même cristal, les formations en fougères rendent compte d'une progression dendritique correspondant aux chemins les plus rapides de cristallisation durant l'évaporation. Puis la structuration se complète pour donner des cristaux à faciès souvent rectangulaire. Les variations de teintes grises à blanche peuvent dénoter soit de légères variations d'épaisseur dans les dendrites, soit de légères torsions développées par des tensions asymétriques dans ce matériau chiral⁶.

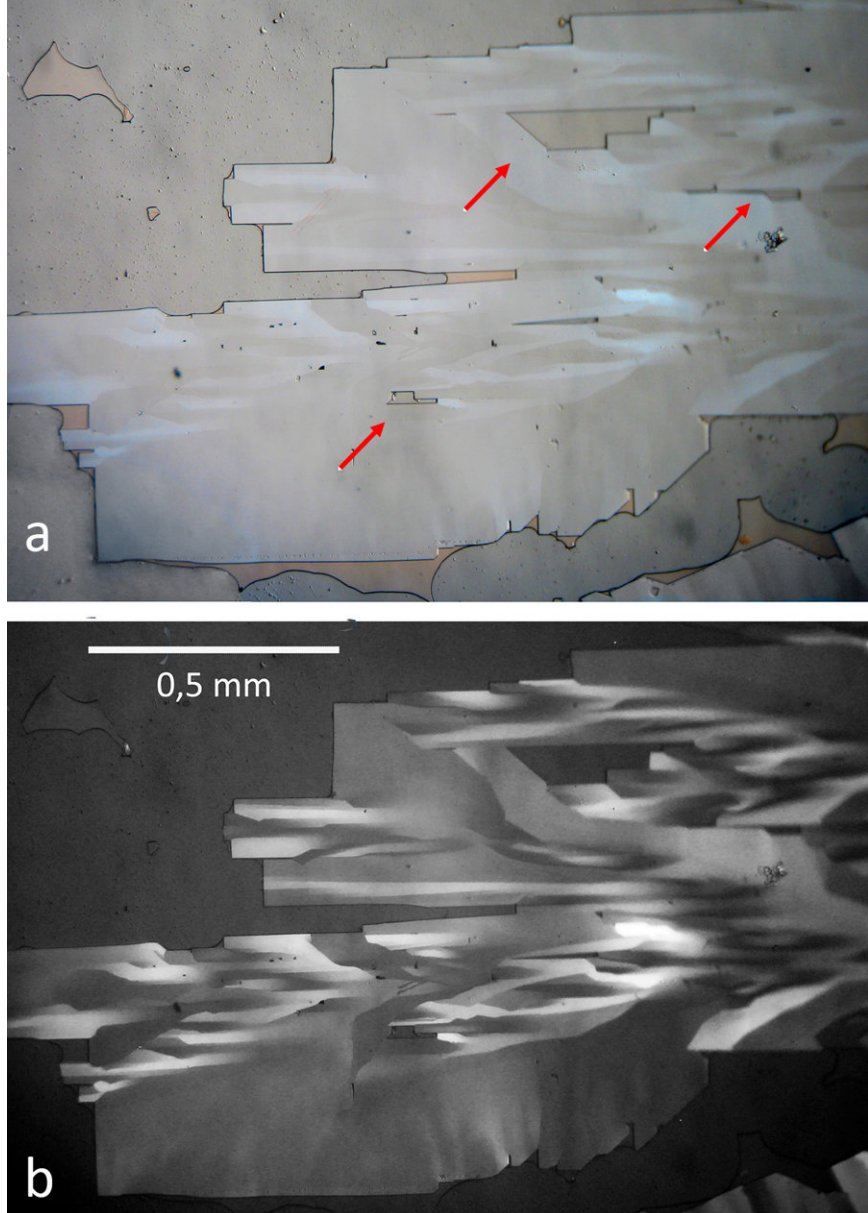


Figure 13 : Croissance entre deux plaques de verre. a) Le monocristal à formes rectangulaires observé en lumière simplement polarisée apparaît beaucoup plus complexe en lumière analysée en b). Les flèches rouges indiquent des cristaux négatifs quasi bidimensionnels. Noter les zones de colorant rose limitées par des bulles d'air. Photos : J.-P. Gauthier.

Figure 13: Growth between two glass plates. a) The single crystal, when viewed under simply polarized light, appears much more complex under analyzed light in b). The red arrows indicate quasi-two-dimensional negative crystals. Note the areas of pink dye bounded by air bubbles. Photos: J.-P. Gauthier.

⁶Un objet est chiral s'il n'est pas superposable à son image dans un miroir. Le saccharose possède un axe hélicoïdal dextrogyre pouvant expliquer les torsions dans des conditions de contraintes, comme le confinement actuel.

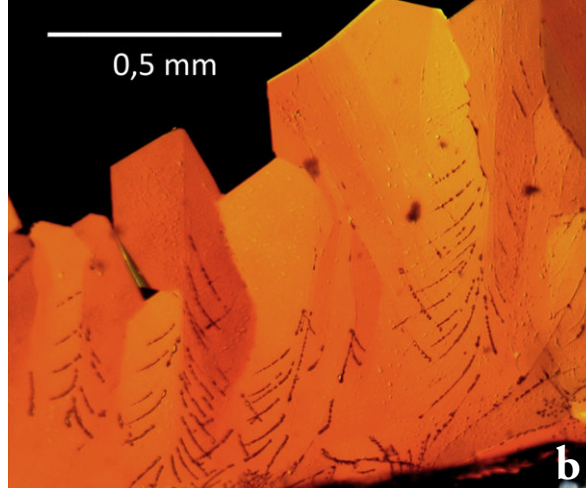
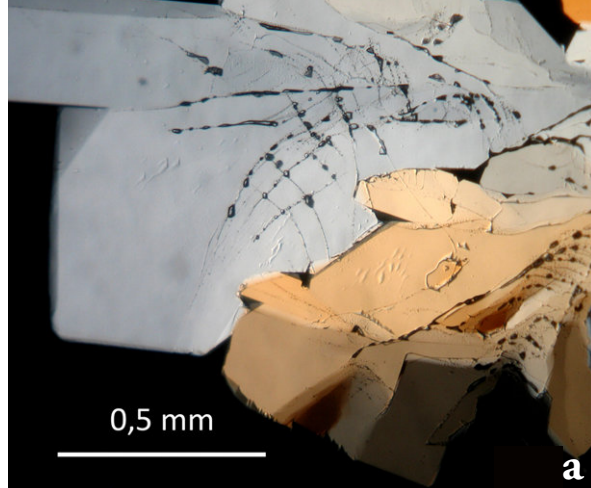


Figure 14 : Réseaux de fractures décorées par des bulles d'air : a) en quadrillage, b) en plume d'oiseau. Photos : J.-P. Gauthier.

Figure 14: Fracture networks adorned with air bubbles: a) grid pattern, b) bird's-foot pattern. Photos: J.-P. Gauthier.

Autres observations

C'est au bout d'environ quatre semaines que la cristallisation sous les lamelles a cessé de s'étendre, faute de nutriment. Cependant, en reprenant les préparations après deux mois, nous avons constaté que certains cristaux en bordure présentaient des craquelures, décorées par des inclusions gazeuses, probablement des bulles d'air. La fracturation pouvait se présenter en quadrillage (Figure 14a) ou en vexilles de plumes d'oiseaux (Figure 14b).

De plus, des amas d'aiguilles cristallines très fines, de largeur de quelques dizaines de microns tout au plus, sont apparus très tardivement (Figure 15). Leur couleur jaune à orangé vif nous a conduits à suspecter leur provenance : il s'agirait des colorants E110 et E124, tous deux annoncés sur l'étiquette de la bouteille d'apéritif. Ce sont des composés diazoïques à forte biréfringence, doués de dichroïsme et de pouvoir rotatoire. Du fait de leur épaisseur très faible, ce dernier ne met pas en cause le fait que ces amas ne présentent pas d'extinction entre polariseurs croisés. C'est plutôt le fait de faisceaux de fibres divergentes et superposées, orientées au hasard.

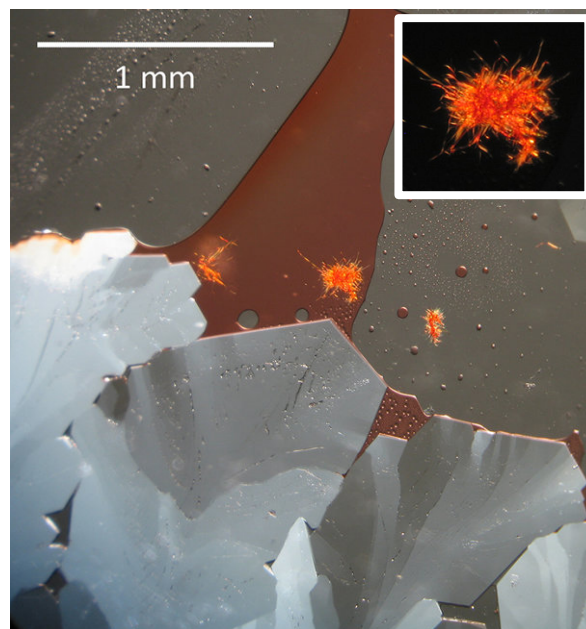


Figure 15 : Amas de cristaux aciculaires dans la solution contenant du colorant. Les cristaux de sucre sont stabilisés et ne grossissent plus. Photo : J.-P. Gauthier.

Figure 15: Clusters of needle-like crystals in the dye-containing solution. The sugar crystals are stabilized and no longer grow. Photo: J.-P. Gauthier.



Figure 16 : Feu d'artifice dans une goutte de solution sucrée. Photo : J.-P. Gauthier.

Figure 16: Fireworks in a drop of sugar solution. Photo: J.-P. Gauthier.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Tout d'abord un court commentaire est à faire à propos du pouvoir rotatoire du saccharose : À 20 °C de température, il est doué d'un pouvoir rotatoire d'environ 31° par millimètre de matière traversée. La biréfringence maximum est $\Delta n = n_V - n_\alpha \approx 0,033$. Si on prend une valeur intermédiaire, par exemple $n = 0,022$, la deuxième frange sombre, marquant le début du 2^e ordre des teintes de Newton, correspond à une épaisseur de 50 μm . Pour cette épaisseur, la rotation serait de $31 \times 50 / 1\,000 = 1,55^\circ$. C'est l'angle dont il faut tourner l'analyseur pour retrouver l'extinction complète. Cette rotation est très peu sensible et n'influe donc pratiquement pas sur les teintes de Newton et nous n'avons pas eu à en tenir compte.

La plupart des études sur le saccharose concernent une cristallisation dans un espace tridimensionnel. Dans le cas présent, trois types de situations ont donné des cristallisations relativement différentes. Tout d'abord dans des gouttes de solution passées au four à 50 °C : Les gouttes se sont aplaties, la solution est devenue un sirop pâteux amorphe, installant une cristallisation lente développée principalement dans le plan horizontal, avec des cristaux d'épaisseur relativement constante, puisque la couleur évolue très peu du centre vers les bords des sphérulites. Puis dans des gouttes bombées, de faible diamètre permettant une croissance partiellement tridimensionnelle, mais contrainte en volume, dont l'épaisseur varie fortement

dans le sens radial, marquée par l'apparition de franges de Newton de plusieurs ordres. Et enfin entre deux plaques de verre, privilégiant une croissance bidimensionnelle, avec des teintes de Newton restreintes au gris et au blanc.

Une étude complète nécessiterait une systématique des paramètres : volume, temps, température, concentration en sucre, et ferait intervenir les notions de tension superficielle de la goutte (rôle de sa courbure), de capillarité, de germination initiale des cristaux, de vitesse de croissance des faces, etc. Mais l'on peut aussi se contenter d'admirer l'explosion des couleurs en feu d'artifice (Figure 16).

Ces observations entreprises sur un mode léger nous ont finalement conduits, sans instrumentation importante de laboratoire (un microscope Leica S8 APO et ses accessoires : polariseurs et lame quart d'onde) et avec les connaissances gemmologiques et cristallographiques usuelles, à nous interroger sur la forme de ces cristaux de saccharose dans un espace confiné. Nous avons par le passé obtenu par hasard quelques cristaux de sucre tridimensionnels isolés, ayant l'habitus décrit sur la Figure 9. Ils avaient curieusement poussé dans une gelée de pétales de pissenlits, élaborée selon la recette d'un grimoire ancestral (réalisation non publiée, mais dégustée). Leur découverte, après deux mois de repos, avait illustré le fait que, dans un gel, les ions diffusent plus lentement, situation favorable à l'apparition de monocristaux et non de sphérulites.

Amis gemmologues, rien n'est plus simple que de pratiquer cette expérimentation. Glucose et fructose composant le saccharose sont des monosaccharides, encore appelés « oses », monomères de glucides. Mais bien sûr, pour les plus perspicaces d'entre vous, le titre de cet article l'avait suggéré. Alors, que diriez-vous, en attendant que les cristaux se forment, et avec modération, d'un petit apéritif dans le même esprit ?

BIBLIOGRAPHIE

Döhl B., Follner H. (1992) Growth mechanism and twinning of sucrose effected by surface adsorption processes. *Crystal Research and Technology*, **27**(1) 3–12, doi:10.1002/crat.2170270102.

Michel-Lévy A., Lacroix A. (1888) Les Minéraux des Roches. Librairie Polytechnique, Paris.

Saska M., Myerson A.S. (1983) The theoretical shape of sucrose crystals from energy calculations. *Journal of Crystal Growth*, **61**(1-2), 546–555, doi:10.1016/0022-0248(83)90183-5.

Sgualdino G., Aquilano D., Tamburini E., Vaccari G., Mantovani G. (2000) On the relations between morphological and structural modifications in sucrose crystals grown in the presence of tailor-made additives: effects of mono- and oligosaccharides. *Materials Chemistry and Physics*, **66**(2) 316–322, doi:10.1016/S0254-0584(00)00326-6.

Sgualdino G., Aquilano D., Vaccari G., Mantovani G., Salamone A. (1998) Growth morphology of sucrose crystals: The role of glucose and fructose as habit-modifiers. *Journal of Crystal Growth*, **192**(1-2) 290-299, doi:10.1016/S0022-0248(98)00414-X.

Vanhook A. (1969) Sucrose crystallization mechanism of growth from aqueous solution. *Journal of Crystal Growth*, **5**(4) 305–311, doi:10.1016/0022-0248(69)90062-1.