



Au cœur des gemmes

INCLUSIONS COMMUNES ET RARES DANS L' AIGUE-MARINE

Marine Bouvier ¹

Abstract

In this article, the author chose to reveal the secrets surrounding two surprising samples of aquamarine from her collection, through the reading and understanding of their inclusions, emphasized both for their beauty and for their remarkable gemological qualities. In the first sample, a star Brazilian aquamarine cabochon, it is possible to observe marvelous fluid inclusions which looks like colored «confetti» as well as more or less filled channels, both showing amazing interference colors. The second sample, corresponds to a prismatic crystal from Pakistan, and reveals two-phase negative crystals as well as hexagonal growth structures, never before described in an aquamarine.

Résumé

Dans cet article, l'auteure a choisi de dévoiler les secrets entourant deux échantillons étonnants d'aigue-marine de sa collection, au travers de la lecture et de la compréhension de leurs inclusions, mises en valeur tant pour leur beauté que pour leur qualités gemmologiques remarquables. Dans le premier échantillon, une aigue-marine étoilée brésilienne taillée en cabochon, il est possible d'observer d'étonnantes inclusions fluides en forme de « confettis » colorés ainsi que des canaux plus ou moins remplis, montrant tous deux d'incroyables couleurs interférentielles. Le second échantillon, est un cristal prismatique du Pakistan, dans lequel on observe des cristaux négatifs biphasés ainsi que des structures de croissance hexagonales, non encore décrites dans une aigue-marine.

¹ Marine Bouvier, Gemmologue, Formatrice indépendante en gemmologie et Experte en pierres, Nice, <https://www.marinebouvier.fr>

Image d'illustration de l'article - Figure 1 : Mise en évidence des deux types d'inclusions (discoïdes et linéaires) perpendiculaires entre elles, dans une aigue-marine brésilienne de 17,65 carats taillée en cabochon (grand axe 18 mm, petit axe 16 mm, hauteur 8 mm). L'axe de croissance (axe d'isotropie ou axe c) se trouve dans la direction des inclusions linéaires. Photo : Marine Bouvier

Figure 1: Highlighting the two types of inclusions (discoid and linear) perpendicular to each other, in a 17.65-carat cabochon-cut Brazilian aquamarine (major axis 18 mm, minor axis 16 mm, height 8 mm). The growth axis (axis of isotropy or «c-axis») is in the direction of the linear inclusions. Photo: Marine Bouvier

INTRODUCTION

L'aigue-marine, pierre de naissance du mois de mars, selon la liste « officielle » révisée en 2002 de l'American Gem Trade Association, est connue depuis des siècles. L'étymologie de cette gemme signifie « eau de mer » (du latin « aqua » et « mare », soit « eau » et « mer »).

Elle correspond à la variété bleue de la famille des béryls de formule chimique $\text{Be}_2\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$. Sœur de l'émeraude (variété verte colorée par le chrome Cr^{3+} et/ou le vanadium V^{3+}) et de l'héliodore (variété jaune colorée par un transfert de charge $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$), l'aigue-marine possède une couleur principale bleue due au fer (Fe^{2+}) et bien souvent une couleur secondaire verte associée, due à une sous-teinte jaune provoquée par un transfert de charge $\text{O}^{2-} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ (Fritsch & Rossman, 1988 ; American Gem Society, 2020 ; Mindat, 2023). Les photos de cet échantillon témoignent de cette sous-teinte verdâtre très présente sur le premier échantillon étudié ici.

Mais si cette gemme est connue depuis l'aube de l'humanité (les égyptiens utilisaient déjà l'aigue-marine sur leurs bijoux) (Harrell, 2012), il est étonnant de voir à quel point ses inclusions continuent de nous émerveiller et même de nous surprendre.

OBSERVATIONS

Comme exemples, j'ai choisi de décrire quelques types d'inclusions étonnantes et parfois peu connues, observées dans deux échantillons d'aigues-marines de ma collection, et de les illustrer avec des photographies prises sous microscope à fort grossissement (photomicrographies).

• Aigue-marine brésilienne

Le premier échantillon correspond à une aigue-marine du Brésil de 17,65 carats taillée en cabochon. Une observation effectuée du côté de la partie plane légèrement inclinée du cabochon, associée à un éclairage arrière permet immédiatement de remarquer de nombreuses inclusions discoïdes

plates disposées sur des plans parallèles, ainsi qu'un deuxième ensemble de fines inclusions linéaires, perpendiculaires aux premières (Figure 1 - image d'en-tête d'article).

Après examen à l'aide d'un microscope et entre filtres polariseurs croisés, on constate que l'axe optique est orienté dans la direction des inclusions fines et longues qui sont de fins canaux parallèles creux ou partiellement remplis. Cette observation est cohérente avec les données de la littérature (Gübelin & Koivula, 1986a). De plus, on peut observer qu'une grande partie

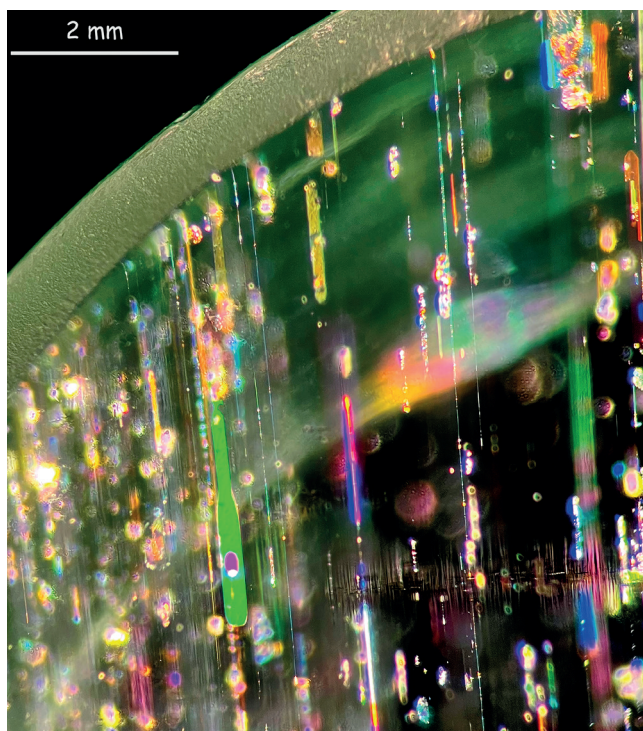


Figure 2 : Canaux de croissance remplis de solutions aqueuses montrant de vives couleurs interférentielles lorsqu'on les éclaire à l'aide d'une fibre optique utilisée en incidence rasante. Largeur de champ : 5,8 mm. Photo : Marine Bouvier

Figure 2: Growth channels filled with aqueous solutions showing bright interference colors when illuminated with an optical fiber used under grazing incidence. Field width: 5.8 mm. Photo: Marine Bouvier

Image d'illustration de l'article : Aigue-marine brésilienne. Largeur de champ : 10 mm. Photo : Marine Bouvier (Figure 4)

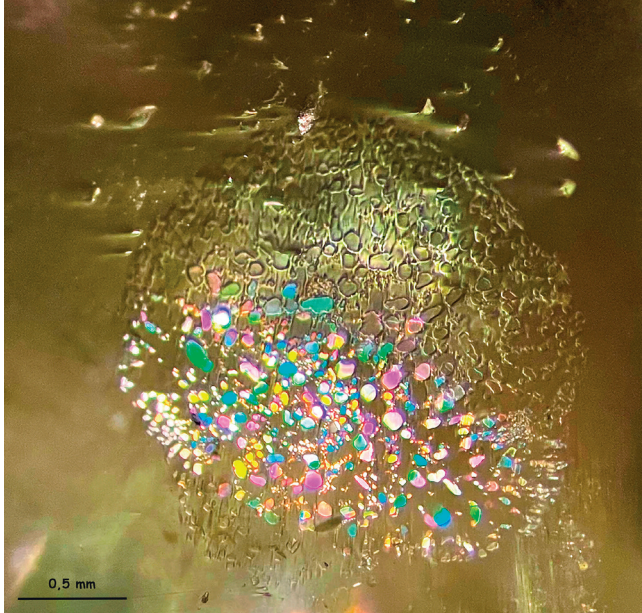


Figure 3 : Inclusion biphasée de « confettis » à moitié éclairée par une fibre optique utilisée en incidence rasante qui permet d'observer ces magnifiques couleurs en partie basse de l'inclusion. La partie haute n'est volontairement pas éclairée identiquement afin que l'on puisse apercevoir la structure de l'inclusion en film mince, comportant des cavités extraplates biphasées sans les jeux de couleurs. Au-dessus de cette inclusion on peut apercevoir l'extrémité des canaux en surface du cabochon. Largeur de champ : 3 mm. Photo : Marine Bouvier

Figure 3: Two-phase inclusion of «confetti» half illuminated by an optical fiber oriented in grazing light. The grazing light source allows the lower part to provide the inclusion these magnificent colors. The upper part is voluntarily not illuminated identically so that one can see the structure of the inclusion in thin film, comprising two-phase extra-flat cavities without the play of colors. Above this inclusion one can see the end of the channels at the surface of cabochon. Field width 5 mm. Photo: Marine Bouvier

des canaux sont remplis de plusieurs phases de solutions aqueuses qui peuvent montrer de vives couleurs interférentielles lorsque le cabochon est éclairé à l'aide d'une fibre optique utilisée en incidence rasante (Gübelin & Koivula, 2005) (Figure 2 - page précédente).

Mais les inclusions les plus intrigantes et à coup sûr, les plus surprenantes, se trouvent être les inclusions discoïdes perpendiculaires à l'axe optique et donc parallèles au plan basal du cristal. Ces inclusions ont un pourtour polygonal. Elles correspondent à de fins films plans et minces composés d'une multitude de cavités extra-plates contenant des fluides mono- ou biphases (contenant un liquide et une bulle de gaz ou un liquide et un gaz dissous). Ces cavités, qui ressemblent à des « confettis » de

couleur, sont encore peu connues, mais sont par ailleurs caractéristiques des béryls et retrouvées dans toutes les variétés de cette famille (Fritsch *et al.*, 2022 ; Gübelin & Koivula, 1986b ; Gübelin & Koivula, 2005 ; Thudsanapbunya, 2021). En orientant très précisément la fibre optique en incidence rasante, on peut les éclairer de façon à obtenir de multiples couleurs interférentielles. La Figure 3 montre une des inclusions volontairement à moitié éclairée où l'inclinaison de la lumière ne permet d'apercevoir le jeu de couleur que sur

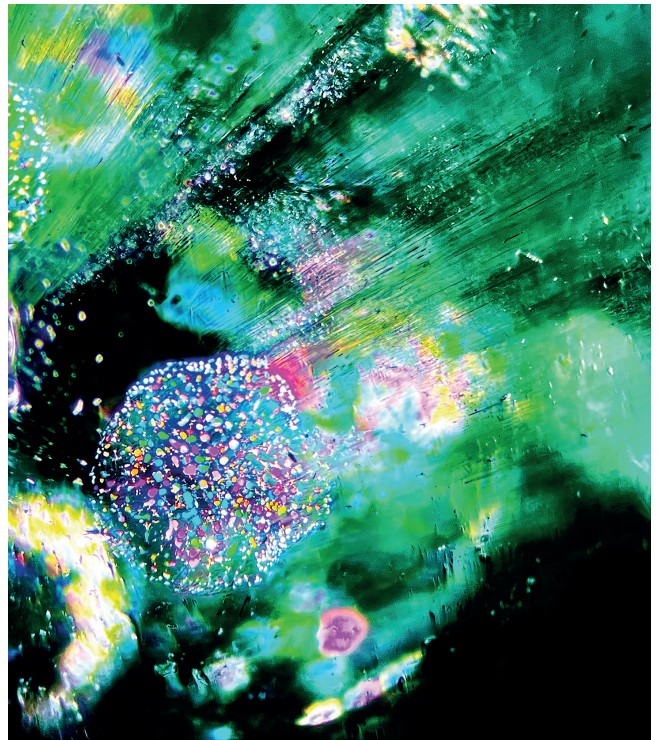


Figure 4 : Photomicrographie d'une inclusion fluide en forme de « confettis » colorés, entourée de multiples canaux dans une aigue-marine (éclairage par fibre optique en incidence rasante). La lumière et le positionnement de l'échantillon sous microscope font ressortir la composante verdâtre de la couleur de l'aigue-marine. Largeur de champ : 10 mm. Photo : Marine Bouvier

Figure 4: Photomicrograph of a colored «confetti»-shaped fluid inclusion, surrounded by multiple channels in an aquamarine (lighting by fiber optic under grazing incidence). The light and the positioning of the sample under the microscope bring out the greenish component of the aquamarine color. Field width: 10 mm. Photo: Marine Bouvier

la partie inférieure. L'observation attentive des différentes taches colorées permet de mettre en évidence de nombreuses formes polygonales, et la plupart du temps hexagonales, qui peuvent alors témoigner de la symétrie hexagonale dans laquelle cristallise le cristal brut du béryl (Mindat, 2023).

La présence de ces superbes inclusions « confettis » additionnée aux canaux de croissance permet alors de produire des photomicrographies artistiques du plus bel effet (Figure 4 - page précédente).

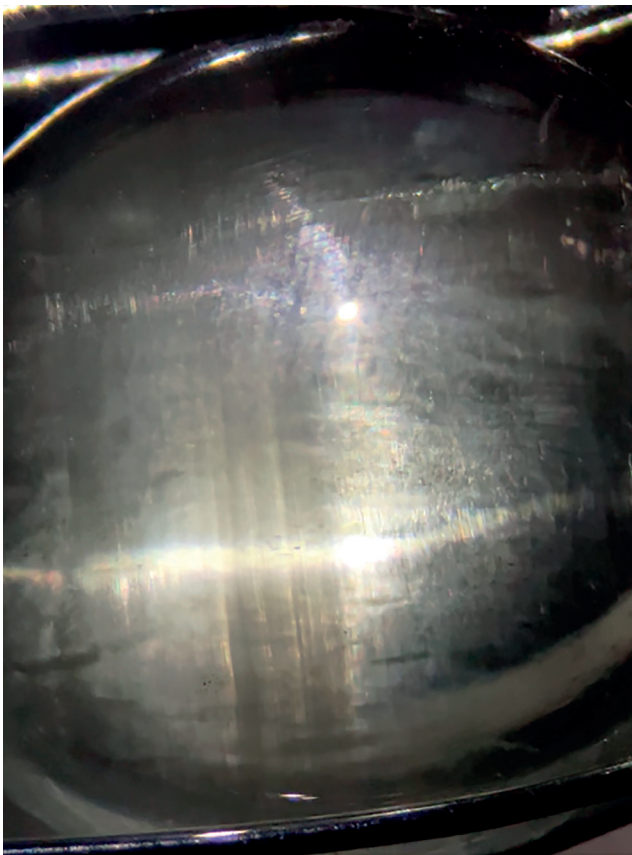


Figure 5 a) : Étoile principale due aux canaux et aux formations discoïdes perpendiculaires. L'étoile secondaire (gauche) proviendrait d'un enchevêtrement local de deux faisceaux de canaux (en b), probablement à l'origine de l'étoile secondaire observée. Photos : Marine Bouvier

Figure 5 a): The main star is due to discoid inclusions and perpendicular channels. The secondary star (left) would come from a local entanglement of two bundles of channels (in b), probably at the origin of the observed secondary star. Photos: Marine Bouvier

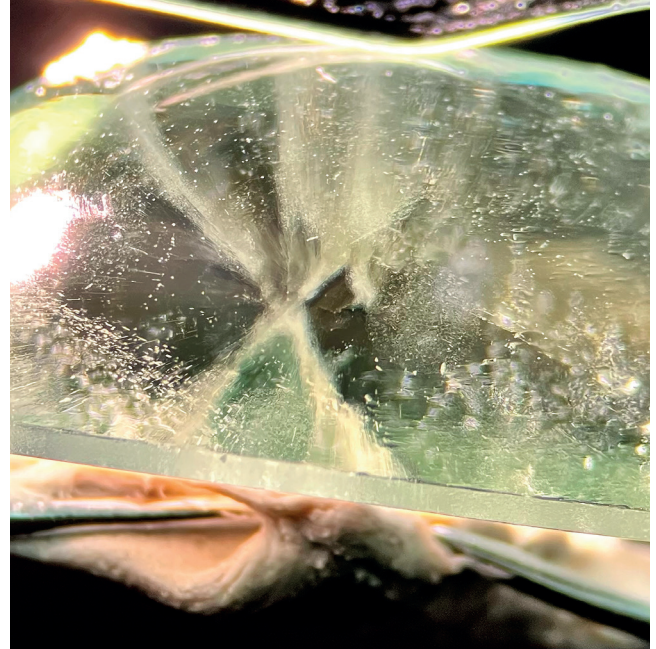


Figure 5 b) : Enchevêtrement local de deux faisceaux de canaux, probablement à l'origine de l'étoile secondaire observée (en a). Photos : Marine Bouvier

Figure 5 b): Local entanglement of two bundles of channels, probably at the origin of the observed secondary star (in a). Photos : Marine Bouvier

Enfin, ce cabochon présente des effets optiques plus ou moins faciles à décrypter. Le plus évident consiste en un œil-de-chat étroit, dirigé selon le grand axe du cabochon, et dans son plan de symétrie lorsque la source et l'observateur se situent au-dessus de la pierre. Il est généré, très classiquement, par l'ensemble des fins canaux parallèles à l'axe optique. À 90° de celui-ci, on constate, plus ou moins facilement suivant la position de la source, un autre œil-de-chat, plus large, formant avec le précédent une étoile à 4 branches (Figure 5a, partie inférieure). Du fait de sa position et de son aspect diffus, voire même discontinu, perpendiculaire aux inclusions discoïdes, et en l'absence d'autres ensembles d'éléments visibles, on subodore que cet œil-de-chat s'apparente à la chatoyance de l'obsidienne décrite par Gauthier *et al.* (2020), produite par le pourtour linéaire de bulles aplaties par le flux de lave, ou ici, par celui des inclusions extra-plates.

Une autre étoile à 4 branches (Figure 5a, partie supérieure) apparaît fugitivement en fonction de la rotation de la pierre sous la source de lumière, et semble très localisée. Il est possible ou probable de l'attribuer à un amas local de deux ensembles de canaux en croix (Figure 5b).

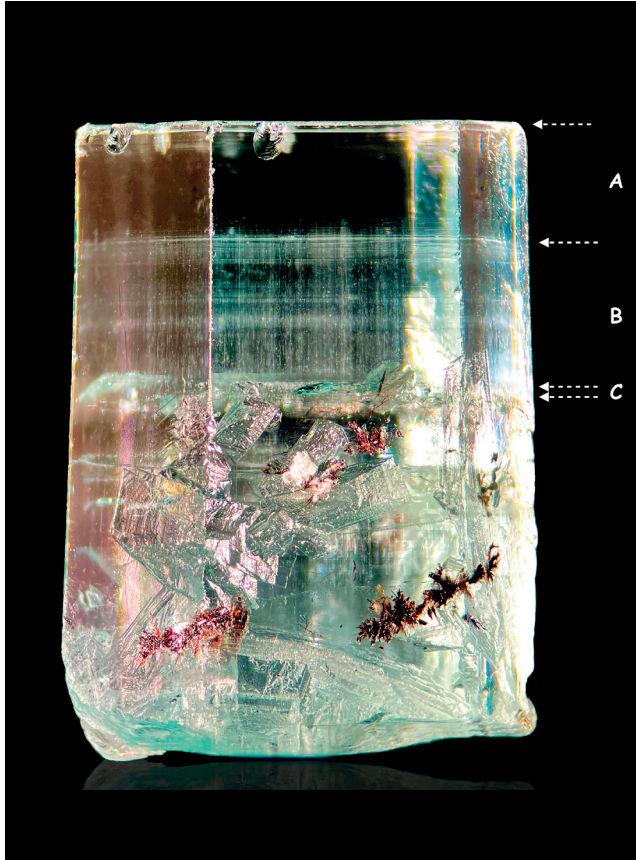


Figure 6 : Cristal brut d'aigue-marine de 2,97 grammes de la vallée de Shigar au Pakistan. Hauteur : 15,41 mm, grande largeur : 11,40 mm, petite largeur : 8,30 mm. Photo : Marine Bouvier

Figure 6: 2.97 g rough aquamarine crystal from the Shigar Valley in Pakistan. Height: 15.41 mm, major width: 11.4 mm and minor width: 8.30 mm. Photo: Marine Bouvier

• Aigue-marine pakistanaise

La seconde pierre correspond à une aigue-marine brute provenant de la vallée de Shigar dans la région du Gilgit-Baltistan au Pakistan. Cette gemme brute de 2,97 grammes possède l'habitus hexagonal typique des béryls et semble être monocristalline.

En observant le cristal dans sa hauteur (Figure 6), j'ai tout d'abord noté que la moitié inférieure du cristal est visuellement très perturbée. Il est possible d'y distinguer de nombreuses inclusions fluides ainsi que des inclusions brun-rougeâtre à l'intérieur du cristal (pouvant être de la columbite et/ou de la goethite selon Gübelin & Koivula, 2005), mais également de nombreuses formes de croissances complexes émergeant à sa surface. J'ai pris le parti dans cet article de m'intéresser essentiellement à la moitié supérieure de l'échantillon, d'une plus grande qualité cristalline.

On remarque alors que cette moitié supérieure peut être décrite selon trois zones superposées. Tout d'abord une partie haute (A) totalement transparente et exempte d'inclusions. Puis la partie sous-jacente (B) marquée par une succession de lignes de croissance horizontales (observables sur tout le pourtour du cristal). Cette région comporte de nombreux canaux longilignes verticaux extrêmement fins, alignés selon l'axe optique.

Et enfin, entre la zone (B) et la moitié inférieure perturbée du prisme, une région de faible épaisseur (C), assez limpide, surtout au centre du cristal. Par une observation de la gemme au travers de la face pinacoïde terminale du prisme d'aigue-marine (figure 7), il est possible, à l'interface de ces deux zones, de distinguer de nombreuses inclusions blanchâtres ou translucides euhédriques, de nature indéterminée.



Figure 7 : Observation du cristal brut d'aigue-marine par la face pinacoïdale terminale. Largeur de champ : 14 mm. Photo : Marine Bouvier

Figure 7: Observation of the rough aquamarine crystal by the upper pinacoidal face. Field width: 14 mm. Photo: Marine Bouvier

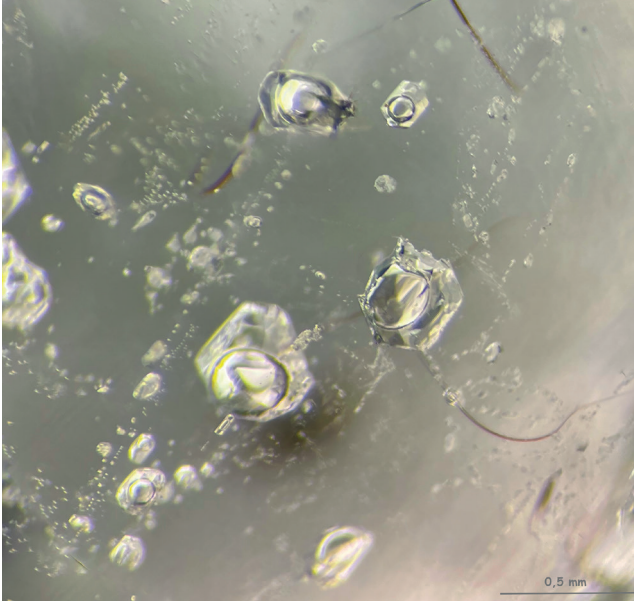


Figure 8 : Divers cristaux négatifs biphasés de formes hexagonales dont les faces sont orientées de la même façon que celles du cristal hôte. Observation par la face pinacoïdale supérieure. Largeur de champ : 2,75 mm. Photo : Marine Bouvier

Figure 8: Some two-phase negative crystals of hexagonal shapes whose faces are oriented as those of the host mineral. Observation through the upper pinacoidal face. Field width: 2.75 mm. Photo: Marine Bouvier

À plus fort grossissement (Figure 8), apparaissent aussi des cristaux négatifs hexagonaux biphasés, c'est-à-dire des cavités creuses à l'intérieur du cristal remplies de fluides, nous rappelant alors l'origine géologique des stades hydrothermaux lors de la formation pegmatitique des aigues-marines (Bhandari, 2022 ; Shigley & Kampf, 1984). La littérature indique que ces cristaux négatifs sont remplis d'une phase gazeuse de CO_2 et de méthane (CH_4) et d'une phase liquide composée d'un mélange eau/ CO_2 dissout ou liquide (Hu & Lu, 2018). Il est intéressant de noter que comme tous les cristaux négatifs dans les gemmes, ces inclusions affichent les formes du système hexagonal et l'orientation des faces correspond à celles de plans cristallins du cristal hôte.

Enfin, en observant attentivement la gemme toujours selon l'axe optique, on peut apercevoir de multiples hexagones regroupés de taille située dans la gamme des dixièmes de millimètre (Figure 9). Extrêmement difficiles à observer et à photographier, ces hexagones, de caractère apparemment bidimensionnel, possèdent des côtés orientés entre eux, mais à 30° des faces du cristal hôte.

N'ayant jamais été rapportés jusqu'alors dans la littérature pour une aigue-marine, l'explication exacte de leur formation reste à préciser. On peut envisager de les apparenter aux sommets de structures colonnaires juxtaposées déjà observées à l'intérieur des plus belles variétés d'émeraudes colombiennes nommées « gota de aceite » (selon Ringsrud, 2008) qui rendent compte d'une croissance concurrentielle par îlots décrite par Koivula & Renfro (2022) laissant place, au-dessus de l'interface (B)-(C), à un bloc monocristallin. Cependant l'existence de

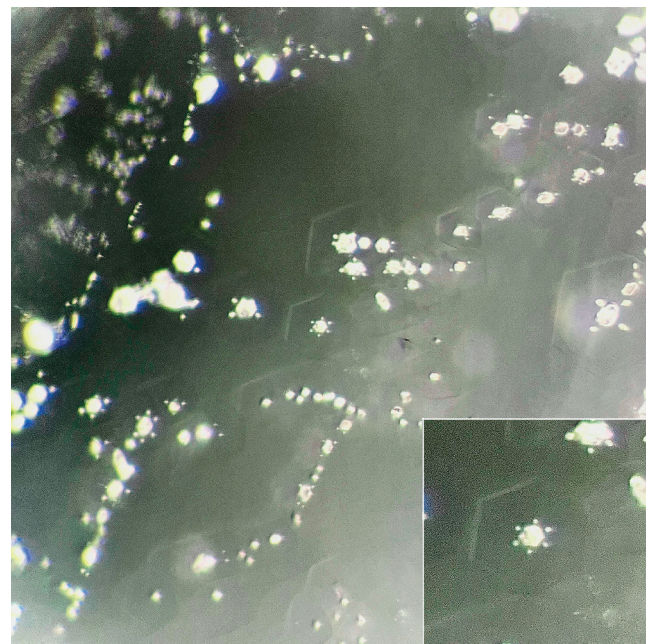


Figure 9 : Structures hexagonales observées au contact des zones (B) et (C), témoins d'une phase de croissance du cristal dont l'origine exacte de la formation reste encore à déterminer. Les côtés de chaque hexagone sont orientés entre eux mais à 30° des faces du cristal hôte. En insert, on observe au centre de chaque hexagone de petites inclusions possédant elles-mêmes une symétrie hexagonale et décorées par 6 taches ponctuelles. Largeur de champ : 1 mm. Photo: Marine Bouvier

Figure 9: Hexagonal structures observed at the contact of zones (B) and (C), witnesses of a growth phase of the crystal whose exact origin of formation remains to be determined. The edges of each hexagon are oriented according to each other but at 30° from the faces of the host crystal faces. In insert, one observes in the center of each hexagon small inclusions possessing themselves a hexagonal symmetry and decorated with six spots. Field width: 1 mm. Photo by Marine Bouvier

petits prismes d'aigue-marine développés en dessous du plan horizontal n'a ici pas pu être formellement identifiée par l'auteure.

De plus, il est intéressant de noter au centre de ces intrigants hexagones, la présence d'inclusions également à symétrie hexagonale. Elles sont orientées à 30° des côtés des hexagones, et donc parallèlement aux faces du prisme. De plus, ces inclusions centrales sont décorées par de petits points blancs à l'avant de chacune de leurs faces (Figure 9, en cartouche). Ce pourrait être l'émergence, au niveau de l'interface (B)-(C), de tubes verticaux situés dans la zone (C), en avant de chaque face. Mais il n'a pas été possible d'en avoir confirmation. Cette observation, bien qu'elle ne puisse apporter une hypothèse quant à la formation de ces structures, témoigne néanmoins de la nature syngénétique de ces inclusions, et du fait qu'elles ne semblent pas se former au hasard mais bien au cours de la cristallisation hexagonale du cristal dont ces petites structures résiduelles sont les témoins.

L'aigue-marine, une gemme bien moins commune qu'il ne semble au premier abord, ne cesse de nous surprendre en nous dévoilant peu à peu les secrets de son apaisante beauté.

BIBLIOGRAPHIE

- American Gem Society (2020)** The Folklore of aquamarine, <https://www.americangemsociety.org/aquamarine-folklore/>
- Bhandari S., Qin K., Zhou Q., Evans N.J. (2022)** Geological, mineralogical and geochemical study of the aquamarine-bearing Yamrang pegmatite, Eastern Nepal with implications for exploration targeting. *Minerals*, 12(5) 564, <https://doi.org/10.3390/min12050564>
- Fritsch E., Delaunay A., Hennebois U. (2022)** Les inclusions dans les émeraudes : point de vue d'un gemmologue, *Émeraudes, tout un monde !* de Gaston Giuliani, les éditions du Piat, p 283.
- Fritsch E., Rossman G.R. (1988)** An update on color in gems. Part 3: colors caused by band gaps and physical phenomena. *Gems & Gemology*, 24(2) 94.
- Gauthier J.P., Fereire J., Bui T.N. (2020)** Origine de la chatoyance dans une obsidienne noire du Mexique. *Revue de Gemmologie a.f.g.*, 208, 28–30.
- Gemdat (2023) Aquamarine.** <https://www.gemdat.org/gem-289.html>. Consulté le 11/02/2023
- GIA (2023) Aquamarine.** <https://www.gia.edu/aquamarine>. Consulté le 11/02/2023
- Gübelin E.J., Koivula J.I. (1986)** Beryl and its inclusions. PhotoAtlas of Inclusions in Gemstones, ABC Edition, Zurich, Switzerland, a) 234–235; b) 242.
- Gübelin E.J., Koivula J.I. (2005)** Inclusions in Beryl. PhotoAtlas of Inclusions in Gemstones, ABC Edition, Zurich, Switzerland, a) 309 b) 312–313; c) 315–316.
- Harrell J. (2012)** Gemstones. UCLA Encyclopedia of Egyptology, 1(1) 9, <https://escholarship.org/uc/item/57f2d2sk>
- Hu Y., Lu R. (2018)** Aquamarine from Pakistan. *Gems & Gemology*, 54(1) 98-101.
- Koivula J.I., Renfro N. (2022)** Quaterly Crystal: Hillocks on Beryl, *Gems & Gemology*, Vol 58(1) 70–71.
- Mindat (2023) Aquamarine.** <https://www.mindat.org/min-289.html>. Consulté le 11/02/2023.
- Ringsrud R. (2008)** Gota de aceite: Nomenclature for the finest Colombian emeralds. *Gems & Gemology*, 44(3) 242–245.
- Shigley J.E., Kampf A. (1984)** Gem bearing pegmatites: a review, *Gems & Gemology*, 20(2) 64–77.
- Thudsanapbunya M. (2021)** Thin-Film Fluid Inclusions in Aquamarine, *Gems & Gemology*, 57(1) 64.