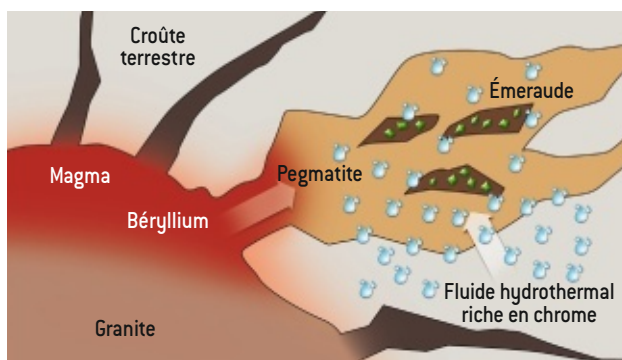


ves. Les fluides riches en chlorure de sodium et sulfates ont alors interagi avec les schistes noirs sédimentaires contenant béryllium, chrome et vanadium. Ainsi, l'émeraude a précipité dans des veines et des cavités à remplissage de calcite (CaCO_3) et de pyrite (sulfure de fer, FeS_2). La matière organique et le soufre dérivé interviennent dans la formation de ces gisements par un mécanisme de thermoréduction des sulfates (oxydation de la matière organique des schistes noirs et réduction du sulfate d'origine évaporitique).

D'autres processus interviennent dans la formation des émeraudes. À Habachtal, en Autriche, le gisement d'émeraude exploité dès l'époque gallo-romaine est associé à une zone de cisaillement qui était contemporaine du métamorphisme régional : les émeraudes et leur gangue présentent des indices de croissance à plusieurs étapes, des textures liées à la variation de la pression et des traînées d'inclusions incurvées.

Ces émeraudes sont d'origine métamorphique, c'est-à-dire liées à la transformation chimique des roches à l'état solide provoquée par leur enfouissement lors de mouvements tectoniques. Cer-



LES PEGMATITES sont une source majeure d'émeraudes. Du magma enrichi en béryllium s'écoule dans une fissure, la dilate et forme une pegmatite en refroidissant. Un fluide hydrothermal lié à cette formation extrait du chrome de la roche environnante, lequel s'associe au béryllium, à l'aluminium et au silicium du fluide pour former des émeraudes dans des poches de la pegmatite.

tains objectent que le modèle classique de la pegmatite pourrait encore s'appliquer : des pegmatites ayant été décelées par ailleurs dans la région, des fluides pegmatitiques auraient pu migrer, en particulier le long de roches cisailées, et former des émeraudes distantes des pegmatites. Néanmoins, l'étude récente des isotopes du bore des tourmalines coexistants avec les émeraudes de Habachtal n'est pas en faveur de cette hypothèse : elle suggère que deux fluides séparés

ont circulé dans la zone de cisaillement, mais qu'aucun de ces fluides n'est d'origine pegmatitique. Un fluide issu du métamorphisme régional a transporté l'isotope léger du bore, comme cela a été observé dans la gangue des émeraudes. L'autre fluide, dérivé de serpentinites (des roches mafiques oxydées par l'eau) intercalées dans la série métamorphique, contient un isotope plus lourd du bore typique des basaltes des dorsales océaniques ou de la croûte océanique altérée.

■ BIBLIOGRAPHIE

J. K. Russell, *Kimberlite ascent by assimilation-fuelled buoyancy*, *Nature*, vol. 481, pp. 352-356, 2012.

L. A. Groat *et al.*, *Crystal chemistry of dark blue aquamarine from the True Blue showing, Yukon Territory, Canada*, *Canadian Mineralogist*, vol. 48, pp. 597-613, 2010.

T. Stachel et J. W. Harris, *Formation of diamond in the Earth's mantle*, *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 21, 364206, 2009.

L. A. Groat *et al.*, *Emerald deposits and occurrences : a review*, *Ore Geology Reviews*, vol. 34, pp. 87-112, 2008.

L. A. Groat [éd.], *The Geology of Gem Deposits*, Mineralogical Association of Canada, Short Course, vol. 37, 2007.

E. Kievelenko, *Geology of Gems*, Ocean pictures, 2003.

G. Giuliani *et al.*, *La route des émeraudes*, *Pour la Science*, n° 277, pp. 58-65, 2000.

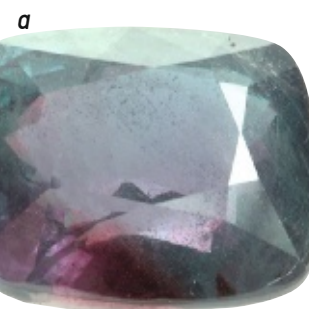
LE CHRYSOBÉRYL

De formule générale BeAl_2O_4 , le chrysobéryl est une autre gemme à base de béryllium, mais il s'agit d'un oxyde distinct des béryls. Sa couleur — du jaune d'or au jaune verdâtre ou brunâtre — est liée aux cations ferriques (Fe^{3+}) qui se substituent à l'aluminium dans la structure cristalline. L'essentiel du chrysobéryl gemme disponible ces dernières années provient de dépôts alluviaux dans les États brésiliens de Bahia, Espírito Santo et Minas Gerais.

Les deux variétés gemmes les plus connues sont l'alexandrite et la cymophane. Bleu-vert en lumière naturelle (a, Tanzanie, largeur 1,5 centimètre), l'alexandrite vire au rouge profond en lumière incandescente (b) — un effet dû à la présence de chrome. La cymophane est un chrysobéryl translucide chatoyant surnommé « œil-de-chat », car des inclusions d'aiguil-

les de rutile parallèles produisent une bande brillante qui se déplace quand on fait tourner la pierre.

Dans les monts Oural en Russie et à Franqueira en Espagne, l'alexandrite est associée à l'émeraude et à la phénakite (un autre silicate de béryllium). Son processus de formation est identique à celui de l'émeraude associée aux pegmatites. Si la plupart des chrysobéryls sont trouvés dans des pegmatites, dans de nombreux cas, la pierre est associée à des minéraux riches en aluminium en général absents des pegmatites. Plusieurs hypothèses ont été avancées sur la formation de ces gemmes. Certaines études ont conclu qu'à hautes températures et pressions, l'assemblage de béryl et de silicate d'aluminium est instable et se décompose en un assemblage de chrysobéryl et de quartz. Selon une au-



tre hypothèse, le chrysobéryl se formerait par accumulation de minces couches sur des cristaux d'olivine préexistants (un silicate de magnésium et de fer), car le chrysobéryl présente une structure de type olivine.

L'étude d'échantillons supplémentaires a conduit à une autre conclusion : le chrysobéryl se formerait à partir de la décomposition d'un autre minéral, la saphirine (un silicate de magnésium et d'aluminium riche en bé-

ryllium, de couleur similaire à celle du saphir) au cours du métamorphisme.

La texture et la composition du chrysobéryl, quant à elles, suggèrent que la pierre s'est formée lorsque des masses de roches métamorphiques à grain moyen ou grossier ont subi des changements de pression et de température intenses. Ce processus, nommé métamorphisme régional de faciès granulite, aurait libéré du béryllium de la roche sédimentaire hôte.

David Weinberg / Wikimedia (CC BY-SA 3.0)

LA TANZANITE ET LA TSAVORITE

La tanzanite (*ci-dessous*) est la variété vanadifère, de couleur bleu foncé, du minéral zoisite, de formule générale $\text{Ca}_2\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3(\text{OH})$: sa couleur est due au vanadium qui se substitue à l'aluminium dans la structure cristalline. En général, la tanzanite non traitée est de couleur marron grisâtre, violet grisâtre, violet brunâtre, bleuâtre et marron verdâtre ; on la chauffe à basse température pour modifier les impuretés et éliminer les nuances indésirables, mais surtout pour obtenir la couleur bleue. La tsavorite (*page ci-contre*), quant à elle, est la variété verte,

de qualité gemme, du grenat calcique alumineux, le grossulaire (du nom de la groseille à maquereaux, de couleur similaire), de formule générale $\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$. Sa couleur est due à la présence de petites quantités de vanadium qui remplacent l'aluminium (grossulaire vanadifère).

La tanzanite et la tsavorite ont toutes deux été découvertes en 1967 en Tanzanie. La plupart des mines et des gisements importants de tsavorite se trouvent en Afrique de l'Est, dans l'Est et le Sud de la Tanzanie, et dans le Sud-Est du Kenya, à proximité

du parc national du Tsavo, et dans le Sud de Madagascar. Tous ces gisements se situent dans des gneiss graphiteux riches en vanadium qui sont associés à des marbres et des niveaux d'évaporite (sels et sulfates).

Les gisements du district de Merelani, en Tanzanie, au pied du Kilimandjaro, restent la seule source connue de tanzanite. C'est aussi dans ce district que l'on trouve les meilleurs cristaux de tsavorite, associés à de la tanzanite et de la tourmaline chromifère. Ces gisements sont situés sur le flanc Ouest d'une série de roches sédimentaires (schistes noirs, calcaires, sels et sulfates) plissées, déformées et « métamorphisées » à une température d'environ 700 °C, nommée la ceinture plissée de Lelatema. La tanzanite et la tsavorite de qualité gemme sont en général concentrées soit dans des veines et filons de quartz dévelop-

pés à la charnière des plis, soit dans des nodules dispersés dans les schistes noirs métamorphiques (gneiss graphiteux) et des calcaires transformés en marbres. Les mécanismes de formation des deux gemmes semblent toutefois distincts.

La tsavorite s'est formée au cours de la phase de réchauffement du métamorphisme régional (métamorphisme prograde), suivant deux types de minéralisation : dans les nodules, la tsavorite a remplacé des sels et des sulfates impurs qui contenaient des argiles à vanadium et chrome. Cette transformation s'est effectuée à une température de 580 à 690 °C et une pression de 5×10^8 à 704×10^8 pascals ; dans les veines de quartz, la circulation du fluide métamorphique calcique et sulfuré a provoqué le dépôt de la tsavorite à une température comprise entre 500 et 590 °C et une pression de $3,6 \times 10^8$ à 5×10^8 pascals.



Didier Descouens / Wikimedia (CC-BY-SA-3.0)

L.-D. Bayle / le Règne Minéral

LA TOPAZE

De formule générale $\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F},\text{OH})_2$, la topaze est majoritairement incolore, mais certaines sont jaune pâle, roses, orange, marron, bleues, vertes ou grises. Les teintes roses et rougeâtres résultent de la substitution de chrome, de manganèse et de fer à la place de l'aluminium. Les couleurs brunâtres et bleues sont dues à une variété de défauts nommés centres de couleur au sein des pierres et sont accentuées par le chauffage. La topaze bleu ciel est apparue sur les marchés au milieu des années 1980 : elle est obtenue en irradiant la topaze incolore à l'aide de neutrons ou de rayons gamma ; l'irradiation entraînerait le déplacement des hydroxyles (OH) dans la structure cristalline. Les défauts ainsi créés absorberaient la lumière à certaines longueurs d'onde, révélant une dominante bleue.

On connaît plus de 80 gisements de topaze bien cristallisée dans le monde. La plupart des topazes de qualité gemme sont produites dans des pegmatites en général peu profondes et enrichies en terres rares, telles celles du Minas Gerais, au Brésil. La région d'Ouro Preto, dans le Minas Gerais, dont sont issues nombre de topazes gemmes, en particulier la variété « impériale » rouge à rose orangé, riche

en chrome, ferait toutefois exception : la topaze contenant des concentrations élevées d'hydroxyle, ses gisements se sont formés dans des veines hydrothermales de quartz issues de la mise en place d'un granite dans des formations mafiques métamorphisées porteuses de chrome. Des gisements similaires sont connus au Pakistan et en Russie.

On trouve aussi des topazes dans des coulées de rhyolite, une roche volcanique riche en silicium et pauvre en fer et en magnésium ; dans l'Ouest des États-Unis et au Mexique, notamment, une ceinture d'unités de rhyolite du Cénozoïque (65 millions d'années) enrichie en fluor est grande productrice de gemmes. Les textures pétrographiques observées sur les roches indiquent que la topaze s'est formée à plusieurs stades à partir du début de la sortie de la lave (extrusion) et à des températures de 650 à 850 °C. À Cerro El Gato (San Luis Potosí, Mexique), cependant, d'autres mécanismes sont invoqués : la topaze incolore aurait cristallisé à plus de 500 °C à partir de fluides enrichis en éléments extraits de la lave par lessivage, tandis que la topaze ambrée se serait formée à moins de 500 °C à partir de fluides plus riches en éléments volatils, dont l'arsenic.



Didier Descouens / Wikimedia (CC-BY-SA-3.0)

John Hill / Wikimedia (CC-BY-SA-3.0)

LE JADE

Le jade désigne deux types de roches : la jadéite, composée en majorité de jadéite ($\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$), et la néphrite, une variété de trémolite-actinolite ($\text{Ca}_2(\text{Mg},\text{Fe})_3\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$) avec de minuscules cristaux. La jadéite est plus dure que la néphrite, mais la ténacité (résistance à la fracture) et l'énergie de surface de la néphrite sont environ le double de celles de la jadéite. Moins courante et plus précieuse que la néphrite, la jadéite est davantage utilisée en bijouterie qu'en sculpture.

La jadéite pure est blanche. Les teintes verte et bleue sont attribuées au remplacement de l'aluminium par du fer, ou par quelques atomes de chrome pour la couleur « impériale » vert émeraude. La couleur mauve serait due à du manganèse dans une jadéite pauvre en fer. Rarement, la néphrite présente une couleur vert émeraude intense par substitution de chrome.

On ne recense que 14 gisements de jadéite. Le principal district producteur est le Jade Tract dans l'État de Kachin, au Nord du Myanmar, où la jadéite se présente sous forme d'intrusions ou de fragments dans des agrégats rocheux à dominante de serpentinite (une roche métamorphique de silicates de magnésium), et dans des gisements alluviaux. Une autre source importante de jadéite est la vallée du Motagua au Guatemala, où deux ceintures de jade associé à de la serpentinite sont les té-