

L'Émeraude

L'éméraude, une des gemmes les plus recherchées (en 2000, une émeraude colombienne de 10,11 carats a été achetée 916 000 euros), est la variété verte et riche en chrome et en vanadium de la famille du béryl – constitué de béryllium, de formule générale $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$. La Colombie fournit environ 60 pour cent de la production mondiale; la Zambie est la deuxième source en valeur monétaire. La production planétaire officielle en 2001 était de 5,5 millions de carats, pour une valeur supérieure à 400 millions d'euros.

Comme le corindon (rubis, saphir), le béryl cristallise dans le système hexagonal. La couleur de l'éméraude est due à des traces de chrome ou de vanadium qui remplacent l'aluminium dans la structure du minéral. Une caractéristique du béryl est qu'il contient de l'eau (jusqu'à trois pour cent de son poids): celle-ci ou d'autres constituants moléculaires et gazeux se situent au cœur d'un empilement atomique hexagonal formé d'anneaux de silicium et d'oxygène. Lors du chauffage d'une émeraude, à plus de 400 °C, l'eau piégée se fragmente en molécules gazeuses qui restent confinées dans les canaux. Elle est libérée à des tempé-

ratures d'environ 800 °C. Ainsi, l'eau des canaux reflète la composition du fluide au moment de la formation du cristal, et la mesure du rapport des isotopes de l'hydrogène de l'eau libérée par le béryl permet de déterminer la source des fluides à partir desquels le béryl s'est constitué.

Des conditions géologiques et géochimiques inhabituelles sont requises pour que le béryllium soit associé au chrome ou au vanadium. Le béryllium se trouve essentiellement dans des roches crustales (formées à l'intérieur des continents) et il est rare dans la croûte continentale supérieure. Il se concentre dans des roches telles que les granites riches en eau, les pegmatites (granites filoniens à gros cristaux) et les schistes noirs (une roche sédimentaire). Le chrome et le vanadium, quant à eux, sont concentrés dans les roches volcaniques associées aux dorsales océaniques, plus précisément dans des roches ignées dites roches ultramafiques ou mafiques telles que les péridotites (riches en magnésium et en fer), les dunites (un type de péridotite) et les basaltes (du magma basique rapidement refroidi) de la croûte océanique et du manteau supérieur et leurs

équivalents métamorphiques. On rencontre aussi parfois de fortes concentrations de chrome et de vanadium dans les roches sédimentaires, en particulier les schistes noirs. Ces derniers contiennent de trois à cinq parties par million de béryllium.

Dans le modèle classique, les pegmatites contenant du béryllium réagissent à l'état de magma avec des roches ultramafiques ou mafiques plus anciennes et refroidies – à teneur élevée en magnésium et en fer, mais contenant aussi du chrome et du vanadium (voir la figure page ci-contre). La pegmatite et la roche ultramafique ou mafique sont altérées par la circulation d'un fluide soit d'origine granitique, soit métamorphique. Les deux roches sont alors transformées en un schiste à biotite (un mica) et une roche riche en feldspath (albite) qui contiennent des émeraudes. Néanmoins, d'autres événements géologiques impliquant la tectonique ont pu jouer un rôle important dans la formation de certains gisements d'éméraude.

En Colombie, notamment, où il n'y a pas trace d'activité magmatique, un modèle unique a été mis en évidence en 1994. Les gisements colom-

biens d'éméraude (plus de 200) se situent dans deux bandes étroites de part et d'autre du bassin sédimentaire de la Cordillère orientale. Les émeraudes se sont formées par croissance hydrothermale associée à une activité tectonique: des fluides du fond du bassin sédimentaire, riches en calcium et sodium, ont interagi avec des lits de sel (évacuaires) intercalés dans des schistes noirs du Crétacé inférieur (de 140 à 100 millions d'années), à des profondeurs voisines de sept kilomètres. À une température voisine de 300 °C, ces fluides saumâtres et alcalins ont migré vers les parties supérieures du bassin sédimentaire, le long de failles de décollement acti-



© Shutterstock/Muellek Josef

LES AUTRES BÉRYLS

D'autres béryls sont utilisés en joaillerie: l'aigue-marine (ci-dessous, b) et le maxixe (bleues), le béryl doré (jaune), l'héliodore (a, jaune verdâtre), la goshénite (incolor), la morganite (c, rose), le béryl rouge...



Leurs couleurs sont dues à la présence d'impuretés. Nos travaux suggèrent que la couleur de l'aigue-marine est due à un transfert de charge entre des ions fer qui ont remplacé l'aluminium du cristal: les cations ferreux (Fe^{2+}) échangent des électrons avec quelques cations ferriques (Fe^{3+}). Le bleu foncé du maxixe résulte de l'inclusion de nitrate (NO_3^-) et de carbonate (CO_3^{2-}) dans les canaux du cristal situés au centre des anneaux structuraux du béryl. La couleur s'atté-

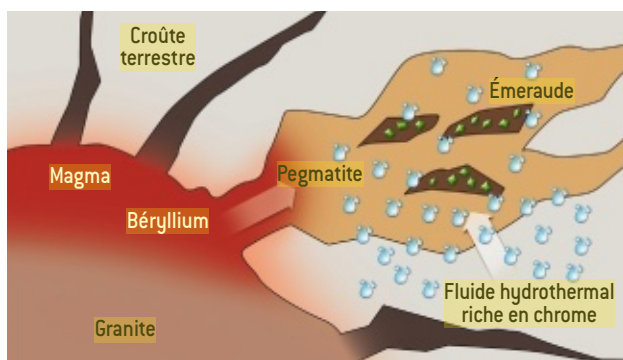
nue avec l'exposition prolongée à la lumière, par déstructuration des atomes d'hydrogène dans le cristal. Une étude récente a suggéré que le nitrate est créé par un processus naturel, alors que le carbonate est dû à l'irradiation par la roche environnante. Les cations ferriques sont responsables de la couleur du béryl doré et de l'héliodore, et les ions manganèse, de celles de la morganite (Mn^{2+}) et du béryl rouge (Mn^{3+}).

À l'exception du béryl rouge, on trouve ces gemmes dans des pegmatites et certaines roches métamorphiques. Le béryl rouge, en revanche, n'a été observé que dans des rhyolites à topaze, une roche volcanique riche en silicium et pauvre en fer et en magnésium, au Mexique, au Nouveau-Mexique et dans l'Utah. Le béryllium du béryl rouge proviendrait de la rhyolite hôte. Sa mobilisation

sous la forme de complexes fluorés aurait été favorisée par la très faible teneur en calcium de la rhyolite hôte, qui a inhibé la formation de la fluorite (CaF_2). Ce phénomène a eu lieu quand les gaz riches en fluor issus de la rhyolite en cours de refroidissement se sont mélangés avec des vapeurs provenant d'une eau hydrothermale souterraine, chaude, produisant un fluide supercritique; la température et la pression d'un tel fluide sont si élevées qu'il s'infiltre à travers les solides comme un gaz tout en dissolvant le matériau comme un liquide. L'absence d'inclusions minérales d'argile dans le béryl rouge suggère qu'il s'est formé à des températures inférieures à celle nécessaire pour la cristallisation du magma rhyolitique (environ 650 °C) et supérieures à celles qui entraînent l'altération de l'argile (200 à 300 °C).

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)