

épisode, ils ont connu un répit de près de 1 500 ans. Leur sort s'est à nouveau dégradé à partir de la colonisation européenne, au ^{xix}^e siècle, l'apparition du fusil à tir rapide et la démocratisation de la chasse. Les lions ont disparu progressivement d'Afrique du Nord entre la fin du ^{xix}^e et le milieu du ^{xx}^e siècle. Le dernier lion sauvage d'Afrique du Nord a été tué au Maroc en 1942. Au Sahara, les lions avaient décliné, mais pas totalement disparu, avec l'extension du désert. Quelques populations isolées ont survécu jusqu'au milieu du ^{xx}^e siècle. Elles ont été éliminées par les Touaregs.

Les derniers lions sauvages d'Eurasie vivent dans la péninsule Kâthiâwar, dans l'Ouest de l'Inde, où une réserve naturelle a été créée. À la fin du ^{xix}^e siècle, leur population a décliné jusqu'à une douzaine d'individus, dont sont issus tous les lions d'Asie actuels, de sorte qu'ils présentent une diversité génétique plus faible que les lions subsahariens.

Le milieu naturel est composé d'un environnement mixte de savanes et de forêts. Le climat alterne entre saisons sèches et moussons. Les cyclones y sont réguliers, pouvant déraciner des centaines d'arbres en quelques heures. La faune comprend une dizaine d'espèces de gros herbivores sauvages, avec une large dominance du chital (*Axis axis*), un cervidé d'environ 50 kilogrammes. D'autres grands carnivores, tels les léopards, peuplent aussi la région.

Une population croissante, mais fragile

À l'inverse de leurs homologues africains, les lions indiens actuels vivent essentiellement dans les forêts. Ils peuvent s'y embusquer près des points d'eau, très fréquentés par les grands herbivores durant la saison sèche. Les mâles indiens sont de meilleurs chasseurs que ceux d'Afrique, notamment parce que leur crierie moins fournie les préserve d'une transpiration excessive, de sorte qu'ils ne dépendent pas des femelles pour se nourrir.

En Inde, les groupes résidents comportent peu d'individus (deux femelles en moyenne) et ont de petits territoires : entre 72 et 81 kilomètres carrés pour les groupes de femelles, et entre 75 et 188 kilomètres carrés pour les groupes de mâles, qui vivent de façon indépendante en dehors des périodes de rut.

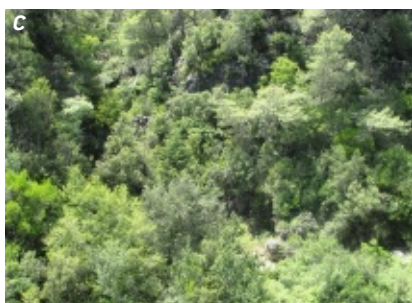
La femelle ne se reproduit que tardivement : elle doit être âgée d'au moins huit ans et établie dans un groupe. Les lions indiens ont une grande fécondité : la population comprenait 177 adultes en 1968, 359 en 2005 et 411 en 2010. Avec la croissance de la population, le territoire des lions s'est naturellement élargi : en 2006, 106 d'entre eux s'étaient établis en dehors de la réserve. Les groupes y sont plus réduits, car les proies sont plus rares et la survie plus aléatoire.



© Brigitte Lon



© Franschojysstuttsstock.com



© Annik Schmitzer

5. DES MILIEUX VARIÉS ont été investis par les lions du groupe nord-africain/asiatique : des bords de cours d'eau (a, dans la vallée de l'Euphrate), des oasis au milieu de déserts (b), des forêts de montagne (c, en Crète)...

Malgré cette croissance, la population indienne reste très fragile, en raison d'une grande uniformité génétique, d'une spermatogenèse anormale (79 pour cent des spermatozoïdes sont non féconds, contre 25 à 61 pour cent pour le lion africain) et d'un taux de mortalité élevé (environ 59 pour cent) parmi les lionceaux. Tout événement climatique ou sanitaire important peut l'anéantir rapidement : le lion est sujet à de nombreux pathogènes, d'autant plus dangereux que

les populations sont petites et que leur uniformité génétique rend difficile la sélection d'une souche résistante.

Autre problème, les lions indiens cohabitent assez mal avec les villages périphériques. Dans la réserve de Kâthiâwar et ses alentours vivent près de 160 000 personnes et plus de 110 000 têtes de bétail. Les lions s'attaquent aux uns et aux autres : entre 1985 et 1995, ils ont tué 11 485 bovidés domestiques, blessé 95 personnes et causé 16 décès humains. Des efforts politiques sont donc indispensables pour améliorer la cohabitation entre l'homme et le lion. En Inde, on a par exemple proposé d'augmenter la densité de proies sauvages, pour diminuer les attaques contre l'homme et le bétail, et d'augmenter la superficie de la réserve : celle-ci passerait de 1 883 kilomètres carrés à 2 500 kilomètres carrés.

Depuis les années 1960, le lion d'Asie bénéficie d'un programme international de reproduction en captivité. Des études génétiques ont déterminé les lions de ce groupe non hybridés, présents dans le zoo de Junagardh, dans la péninsule Kâthiâwar. On les a ensuite faits se reproduire, jusqu'à obtenir près d'une centaine de lions. Entre 1991 et 1992, ceux-ci ont été envoyés dans 36 zoos du monde entier (Zurich, Helsinki, Nantes...). Ces lions seront-ils relâchés un jour ? C'est envisageable, notamment dans la région de Junagardh, où ils pourraient être accueillis dans la réserve.

Les programmes de survie du lion d'Asie s'appuient aussi sur des recherches comportementales. Les zoologues tentent de préciser les conditions les plus favorables à son développement, ce qui pourrait améliorer le choix des futures réserves.

La préservation de l'espèce, de l'Asie à l'Afrique, dépend de l'homme, en pleine expansion démographique. Dans ce contexte, la question de l'acceptation du lion par l'homme est cruciale. Elle est liée à des héritages symboliques – le lion est très présent dans les traditions culturelles de tous les continents –, et aux évolutions sociétales plus récentes, par exemple la préoccupation pour la biodiversité. Une certaine éthique environnementale serait également importante, afin de limiter au maximum la chasse dans les parcs nationaux. Quant à la question des exhibitions d'individus captifs, elle reste ouverte, même si les zoos ont au moins l'intérêt d'éviter une disparition pure et simple. Mais, à l'évidence, ce n'est pas une fin en soi. ■

La géologie des gemmes

Lee Groat et Gaston Giuliani



L'ESSENTIEL

- Composition chimique, structure cristalline, origine, nature des inclusions : chaque gemme présente des caractéristiques liées aux conditions de sa formation.
- En les étudiant, les géologues remontent aux mécanismes qui ont conduit à la formation des gemmes.
- Leurs travaux permettent de prospecter de nouveaux gisements et de mieux comprendre les processus mis en jeu dans les profondeurs de la Terre.

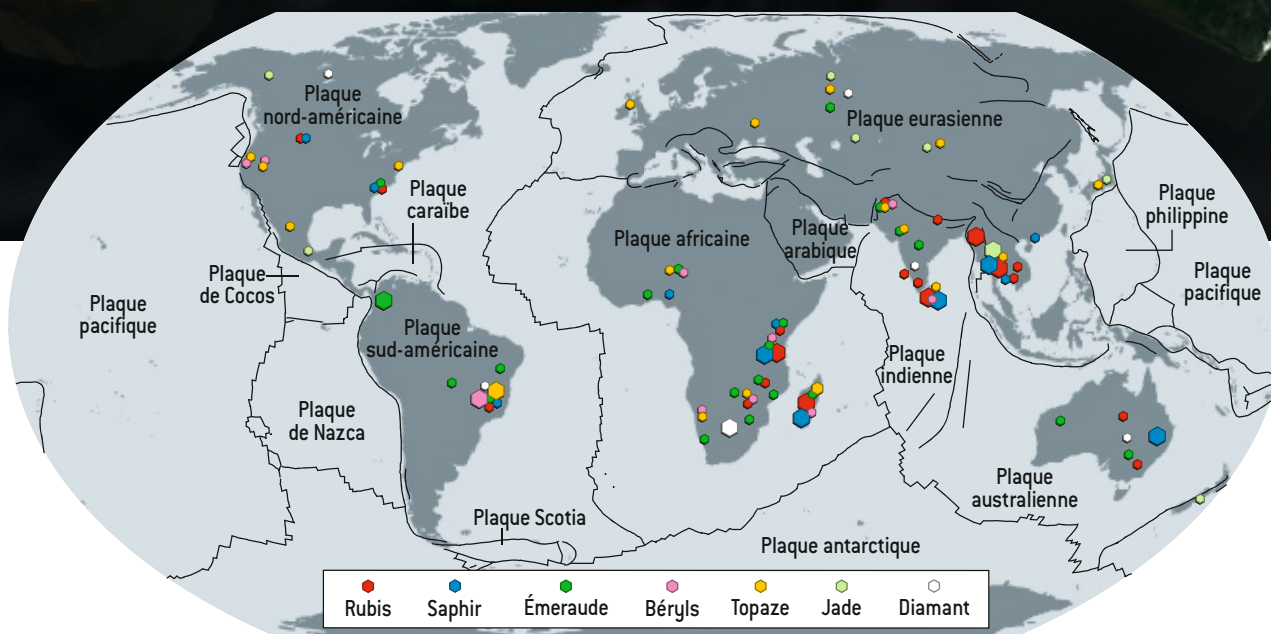
Diamant, rubis, saphir, émeraude, topaze, jade...
Les gemmes sont autant d'indices qui renseignent les géologues sur les conditions régnant dans les profondeurs de la Terre.

Objets prisés depuis des milliers d'années, les gemmes sont appréciées pour leur couleur, leur lustre, leur transparence, leur longévité et... leur valeur commerciale. Nombre de gemmes étant produites par de petites exploitations dans des régions reculées de pays en développement, il est difficile d'obtenir des statistiques précises sur leur production et leur valeur. En 2008, on estimait néanmoins la production mondiale de diamants bruts à dix milliards d'euros et, en 2001, le commerce mondial de gemmes colorées s'élevait à près de cinq milliards d'euros par an, selon le magazine *Colored Stone*.

Si les gemmes atteignent des valeurs si élevées, c'est en partie en raison de leur rareté. Un gisement de diamant produit en moyenne cinq grammes de gemmes par tonne de matériau extrait, et seuls 20 pour cent de ces gemmes sont de qualité joaillière. Comme le pétrole, les gemmes se forment sur des temps longs, même à l'échelle géologique : par datation radiométrique des inclusions piégées par les diamants, on a déterminé que certaines formations de gemmes ont entre 970 millions et 3,2 milliards d'années. Les gemmes de haute qualité sont extraites beaucoup plus vite qu'elles ne sont produites, ce qui en fait une ressource finie.



© Stephen J. Krasemann/All Canada Photos/Corbis



Par exemple, la mine d'émeraude découverte en 1981 à Santa Terezinha de Goiás au Brésil a produit, en 1988, 25 tonnes de pierres brutes estimées à sept millions d'euros ; en 2000, le même tonnage s'est vendu pour seulement 710 000 euros. Des formes synthétiques de nombreuses gemmes existent aujourd'hui, mais elles n'ont pas encore d'impact sérieux sur le marché international des gemmes.

Cette rareté rend aussi les pierres gemmes « précieuses » pour les géologues. Des conditions géologiques exceptionnelles sont nécessaires pour produire les gisements de gemmes. Quelles sont ces conditions ? Où trouver de nouvelles gemmes ?

Un nombre croissant de géologues se penchent aujourd'hui sur ces questions avec l'espoir de mieux comprendre l'origine des gemmes et les mécanismes qui conduisent à leur formation. Notamment, si la géologie du diamant est étudiée depuis plusieurs décennies, on ne s'intéresse aux processus de formation des gemmes de couleur que depuis une vingtaine d'années, et, nous allons le voir, elles sont loin d'avoir révélé tous leurs secrets.

Il existe des dizaines de types de gemmes. Nous nous intéresserons à quelques-unes parmi les plus connues et les plus importantes sur le marché international : le diamant, le rubis et le saphir, l'émeraude

et d'autres variétés du béryl, le chrysobéryl, la tanzanite, la tsavorite, la topaze et le jade (parmi les gemmes courantes dont nous ne traiterons pas ici, citons l'ambre, l'améthyste, la calcédoine, le grenat, la lazurite, la malachite, les opales, le péridot, la rhodonite, le spinelle, la tourmaline, la turquoise et le zircon).

ON TROUVE SOUVENT LES GEMMES dans des zones d'activité tectonique ou volcanique, mais certains gisements sont localisés à des endroits sans signe d'activité magmatique. La taille des symboles indique l'importance économique des gemmes dans une région donnée. En photo, des émeraudes brutes et taillées.

LE DIAMANT

Le diamant est la phase cristalline du carbone stable à très haute pression. C'est la gemme la plus « précieuse » ; certaines pierres coûtent jusqu'à 400 000 euros le carat (un carat équivaut à 0,2 gramme), soit plus de 15 millions d'euros la pièce. Les études sur l'origine et la signification des structures, des roches hôtes ainsi que les inclusions piégées par le diamant ont permis de déterminer les équilibres des phases minérales des profondeurs terrestres et même conduit à l'élaboration de protocoles pour la synthèse du diamant en laboratoire.

Pendant des centaines d'années, la région de Golkonda, dans l'Inde centrale, a été la première source de diamants, jusqu'à la découverte de gisements au Brésil au XVIII^e siècle, puis à Kimberley, en Afrique du Sud, en 1866. Aujourd'hui, les trois principales nations productrices de diamants sont le Botswana, la Russie et le Canada, suivies de l'Angola, l'Australie, le Congo, le Lesotho, la Namibie, la Sierra Leone et l'Afrique du Sud.

Le diamant cristallise dans le système cubique : les atomes de carbone qui le composent sont disposés

aux sommets d'un réseau dont la maille est un cube de 0,356 nanomètre d'arête. Cette maille conduit à des formes variées : octaèdres, cubes, cubo-octaèdres ou agrégats moins réguliers. Le diamant présente diverses propriétés physiques, telle l'émission d'une lueur lorsqu'il est soumis à un rayonnement ultraviolet ou X. Cette caractéristique commune aux pierres gemmes est due à l'absorption du rayonnement par les défauts de la structure cristalline ; excités par le rayonnement, les électrons de ces défauts vibrent et se dés excitent en émettant de la lumière. Cette fluorescence est exploitée dans le traitement du minerai pour distinguer les diamants des roches sans intérêt, car les longueurs d'onde d'émission lumineuse varient selon la provenance des gemmes – naturelles, synthétiques ou fausses.

La couleur des diamants naturels est liée à leurs impuretés et aux défauts de leur réseau cristallin. Les diamants contenant des impuretés d'azote – dits de type I – sont incolores, bruns ou jaunes quand les impuretés sont regroupées, et jaunes, orangés ou bruns quand elles sont plus diffuses. Certains

sont aussi roses, rouges ou violets : cette couleur serait liée à la déformation de la région du réseau cristallin portant les impuretés, après la formation de la gemme. Les diamants de type II contiennent peu ou pas d'impuretés d'azote, mais peuvent avoir des impuretés de bore, qui rendent le diamant bleu à gris. Les diamants purs sont incolores ou marron.

C'est en étudiant les inclusions minérales dans les diamants que l'on détermine leurs conditions de formation. D'une part, la nature de ces inclusions permet de calculer les pressions et températures de l'environnement dans lequel ils se sont formés. D'autre part, on détermine l'âge des diamants par datation radiométrique de certaines inclusions : on mesure la proportion des différents isotopes d'un même élément dans un matériau qui a subi une désintégration radioactive au cours du temps géologique. Dans un diamant, une telle analyse s'effectue en étudiant les inclusions de silicates et de sulfures, contemporains de sa formation. À une restriction près : si ces

DIAMANT sur sa gangue de kimberlite (taille 1 cm environ).



LE RUBIS ET LE SAPHIR

Le rubis et le saphir sont des variétés de corindon, un oxyde d'aluminium de formule générale Al_2O_3 . Ce sont sans doute les pierres gemmes colorées les plus vendues au monde. Représentant environ un tiers des ventes en valeur, ils atteignent des prix parmi les plus élevés : en 2006, un rubis birman de 8,62 carats s'est vendu 2 860 000 euros et, en 2009, un saphir du Cachemire de 16,65 carats a été acheté 1 880 000 euros.

Le corindon cristallise dans le système hexagonal : il présente un axe de symétrie d'ordre 6 (sa maille est un prisme droit dont la base est un losange, et trois mailles forment un prisme droit à base hexagonale). C'est le remplacement des ions aluminium par d'autres éléments – chrome, titane, fer – qui transforme ce minéral en gemmes colorées : le rubis est rouge, le saphir est bleu, et les autres saphirs sont nommés par leur couleur (jaune, rose, violet, vert, orangé-rose, etc.).

La couleur du rubis est due au chrome, qui est également responsable de la couleur... verte de l'émeraude. Pourquoi cette différence de couleur ? Dans ces deux gemmes, le chrome est entouré de six atomes d'oxygène, mais il n'absorbe pas la lumière de la même façon. Selon une des théories avancées, cette variation de couleur serait liée au potentiel électrostatique imposé par le reste des ions du réseau sur les électrons actifs de l'unité chrome-oxygène. Un champ électrique est ainsi créé dans le voisinage de l'ion chrome du rubis, alors qu'il n'en apparaît pas dans l'émeraude en raison de la symétrie de son réseau. Cette charge entraîne un décalage du spectre d'absorption du rubis vers des énergies plus hautes, de telle sorte que la gemme absorbe la lumière visible dans deux domaines de longueurs d'onde centrés sur 400 et 550 nanomètres, et émet de la lumière à 480 nanomètres (bleu) et 610 nanomètres (rouge).

Le rubis semble rouge parce que l'œil humain est plus sensible au rouge au-dessus de 610 nanomètres qu'au bleu. La fluorescence rouge sous lumière ultraviolette et, parfois, à la lumière du jour, combinée à la couleur rouge du rubis explique l'effet de feu observé dans de nombreux rubis du Myanmar et du Vietnam.

La couleur bleue du saphir est liée au transfert d'électrons entre les ions fer (Fe^{2+}) et titane (Ti^{4+}) remplaçant les ions aluminium (Al^{3+}) dans la structure (moins de 0,01 pour cent d'ions fer et titane suffisent). Lors de leur transfert, les électrons absorbent de l'énergie à une longueur d'onde spécifique du domaine visible, et la couleur correspondante n'est plus perçue. Dans le saphir, les électrons transférés absorbent la lumière de l'extrémité rouge du spectre, ce qui donne un aspect bleu à la gemme. Incolore, le saphir « geuda » est souvent chauffé pour obtenir une plus grande transparence et des colo-



SAPHIR découvert sur l'île de Baffin, au Canada, en 2002.

Avec l'aimable autorisation de Lee Groat

inclusions se situent le long des plans de clivage du diamant, leur analyse ne témoigne pas nécessairement de l'âge de sa formation, car les compositions isotopiques des inclusions peuvent aussi refléter l'âge de l'éruption volcanique qui a porté le diamant à la surface terrestre.

Le scénario de formation des diamants se dessine ainsi. Ils cristallisent à des profondeurs de 135 à 200 kilomètres et à des températures de 1 100 à 1 200 °C. La majorité provient de la lithosphère – la croûte rigide et le manteau supérieur de la Terre –, sous des parties anciennes et stables de la croûte continentale nommées cratons. Ces derniers sont éloignés des zones de subduction. Le diamant cristallise à la base (la quille) des cratons anciens, là où l'énergie géothermique est affaiblie par les masses plus froides constituées par la croûte. Pauvre en silice, ce milieu est dominé par des roches telles que la péridotite et l'éclogite, riches en magnésium et en fer. D'autres diamants se forment dans la sublithosphère – les couches profondes de la Terre, jusque dans le manteau inférieur.

Deux processus ont pu conduire à la formation des diamants. Le premier est la réduction (gain d'électrons) du carbonate (CO_3^{2-}) à l'état solide, ou dissout dans une roche fondue ou un fluide riche en éléments chimiques. Le carbonate, quant à lui, proviendrait de deux minéraux, la dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ou la magnésite (MgCO_3). Il se formerait lorsque des substances chimiques volatiles, tel le dioxyde de carbone (CO_2), se sont échappées de la croûte océanique alors qu'elle glissait par subduction sous une autre plaque tectonique et pénétrait dans une région de roche fondue.

Le second processus est l'oxydation (perte d'électrons) de carbone réduit en méthane. D'où provient ce méthane ? Sans doute de fluides réduits présents dans le manteau supérieur. L'eau libérée par l'oxydation du méthane faciliterait la circulation de fluides réactifs riches en carbone dans la lithosphère subcratonique, lesquels enclencheraient une lente métamorphose (métasomatose) de la zone traversée où cristallisent les diamants.

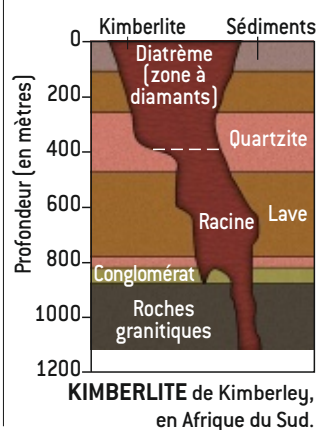
L'origine du carbone des diamants reste cependant ambiguë et fait en-

core l'objet de recherches. Les modèles d'évolution du manteau suggèrent que les diamants ayant plus de 2,5 milliards d'années résultent d'une oxydation de méthane, alors que ceux qui ont moins de 2,5 milliards d'années auraient été formés par réduction de carbonate.

Quelle que soit la profondeur de leur formation, les diamants sont transportés vers la surface par des masses de roche fondue en ascension rapide – des magmas de kimberlite (*ci-contre*) ou de lamproïte (selon leur composition) – qui proviennent des zones de croissance de la gemme ou de plus grandes profondeurs. Les kimberlites jaillissent à des vitesses moyennes de 10 à 30 kilomètres par heure grâce à la libération rapide de dioxyde de carbone et d'eau, qui engendre une poussée ascensionnelle. Pourquoi cette libération ? James Russell et ses collègues, de l'Université de Colombie-Britannique, aux États-Unis, viennent d'en élucider le mécanisme. Dans des expériences à haute température, ils ont montré qu'en montant, le magma quitte une région riche en carbone pour une région riche en silice. Il se charge en silice, ce

qui entraîne une chute rapide de la solubilité du dioxyde de carbone et, par conséquent, une expulsion continue et vigoureuse du gaz qui stimule l'ascension du magma kimberlitique.

Les kimberlites ont en général un âge de formation compris entre 65 à 135 millions d'années, mais atteignant pour certaines 1,1 milliard d'années. Elles sont en général plus jeunes que les diamants qu'elles transportent, lesquels se sont globalement formés de quelques centaines de millions à quelques milliards d'années plus tôt.



ris bleus : en fondant, les inclusions libèrent du fer et du titane, et le transfert de charge peut avoir lieu. Dans le saphir orangé-rose, nommé padparadscha (« couleur de la fleur de lotus » en sanskrit), l'aluminium est remplacé par une combinaison d'ions chrome (Cr^{3+}), qui crée une teinte rose, et d'ions fer (Fe^{3+}), dont le transfert de charge avec les ions oxygène (O^{2-}) produit une teinte jaune.

La plupart des corindons gemmes sont extraits à partir de dépôts de sédiments (placers) alluviaux (transport par l'eau), colluviaux (transport par la gravité) et éluviaux (érosion), ou de sédiments compactés et solidifiés (paléoplacers). Les gisements se sont formés dans des régions ayant subi des événements géodynamiques tels des collisions, des rifts et des phénomènes de subduction. Trois périodes de formation ont été identifiées : l'orogénèse panafricaine (entre 750 et 450 millions d'années), qui a produit des gi-

sements primaires de corindon gemme en Afrique, en Inde, à Madagascar et au Sri Lanka ; l'orogénèse himalayenne avec ses marbres à rubis en Asie (entre 45 et 5 millions d'années) ; et les extrusions de basalte alcalin au Cénozoïque (entre 65 et 1 million d'années).

La formation des rubis et saphirs rosés les plus fins, provenant des marbres de l'Asie centrale et du Sud-Est, vient d'être élucidée. Voici plus de 250 millions d'années, les régions étaient occupées par des lagons peu profonds et des deltas alimentés par la mer et les rivières. Peu à peu, les sédiments charriés s'accumulaient sur le fond, se mêlant aux dépôts calcaires d'origine marine. Ces lagons étaient partiellement isolés et riches en saumures (sels et sulfates). Lors de l'orogénèse himalayenne, les empilements sédimentaires – où alternent calcaires, grès et sels – ont été chauffés par le métamorphisme régional (la transformation chimique des roches à l'état

solide). Les grès se sont transformés en quartzites et les calcaires en marbres – formés de calcite (CaCO_3). Entre 600 et 650 °C et à des pressions de l'ordre de 3×10^8 pascals, les sels ont fondu et ont réagi avec le marbre environnant, qui contenait de l'aluminium (environ 0,1 pour cent d' Al_2O_3), du chrome et du vanadium pour former du rubis. Une étude comparable est réalisée actuellement sur du saphir rose dans des marbres de la Colombie-Britannique.



L.-D. Bayle / Le Règne Minéral

■ LES AUTEURS



Lee GROAT est professeur de sciences de la Terre et des océans à l'Université de Colombie-Britannique, où il dirige le programme de sciences intégrées.

Gaston GIULIANI est directeur de recherche à l'Institut de recherche pour le développement (GET / IRD) et au CRPG/CNRS, à Vandœuvre-lès-Nancy, où il dirige des programmes sur la géologie des gemmes avec les pays du Sud.

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.

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).