

## LE DIAMANT

**L**e 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<sup>e</sup> 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 désexcitent 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

**L**e 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 ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) 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 ( $\text{MgCO}_3$ ). Il se formerait lorsque des substances chimiques volatiles, tel le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), 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.

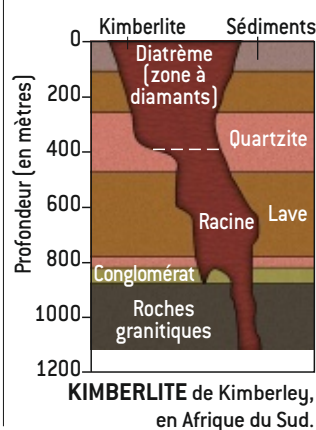
L'origine du carbone des diamants reste cependant ambiguë et fait en-

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 ( $\text{Cr}^{3+}$ ), qui crée une teinte rose, et d'ions fer ( $\text{Fe}^{3+}$ ), dont le transfert de charge avec les ions oxygène ( $\text{O}^{2-}$ ) 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 ( $\text{CaCO}_3$ ). Entre 600 et 650 °C et à des pressions de l'ordre de  $3 \times 10^8$  pascals, les sels ont fondu et ont réagi avec le marbre environnant, qui contenait de l'aluminium (environ 0,1 pour cent d' $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), 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*.