

COMMENT SE FORMENT LES ÉMERAUDES

Alain Cheilletz
Gaston Giuliani

Caractériser la géologie des gisements pour mieux distinguer les vraies des fausses

ALAIN CHEILLETZ
est maître de conférences
à l'École nationale
supérieure de géologie-
INPL à Vandœuvre-lès-
Nancy et au CRPG
(Centre de recherches
pétrographiques et
géochimiques) -
UPR A9046 du CNRS
chaille@crpg.cnrs-nancy.fr

On également participé
à cette étude :
Jean-Louis Zimmermann,
Bernard Charoy,
Yannick Branquet,
Anna-Maria Ribeiro
Althoff, Thierry Arhan,
Benoît Lopes, Bruno
Sabot, Jérôme Massot
(CRPG) et Bernard
Laumonier (École des
mines de Nancy).

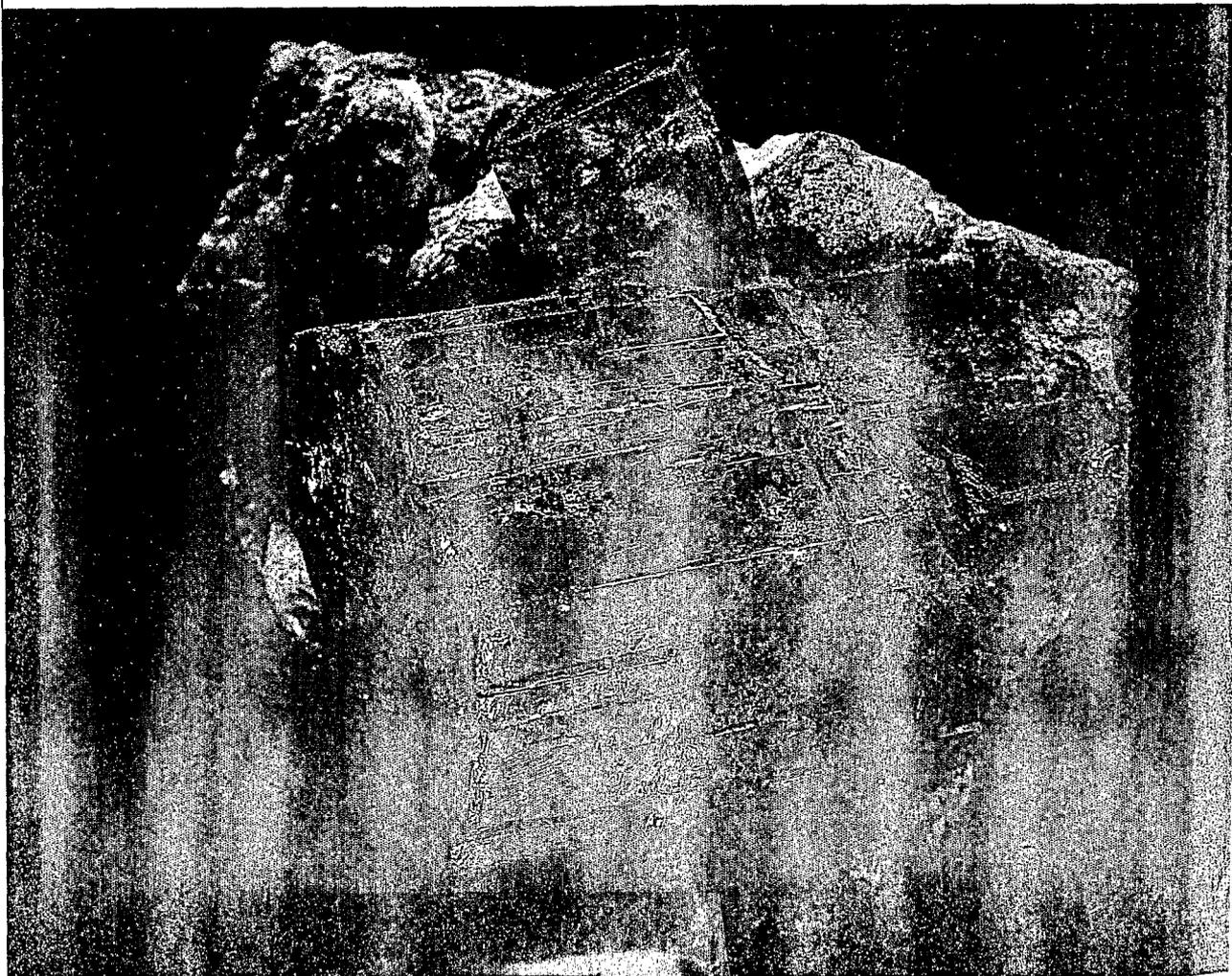
**Admirée et recherchée depuis
l'Antiquité, l'émeraude n'en demeurait
pas moins jusqu'à ces dernières
années une énigme pour les géologues.
Pourquoi est-elle si rare ? Et ses
couleurs si changeantes ?
Où et comment se forme-t-elle ?
Pour la première fois, un modèle
général est proposé pour les deux
grands types de gisements identifiés à
ce jour. On s'achemine progressivement
vers la création d'une véritable carte
d'identité des émeraudes.**

Les forêts tropicales de Colombie
ou d'Afrique de l'Est, les inter-
minables étendues semi-déserti-
ques du Sertão brésilien ou du Rajas-
than indien ou encore les sommets
himalayens du Pakistan et d'Afgha-
nistan ont en commun d'abriter les
plus grands gisements d'émeraudes.
A première vue identiques, surtout
lorsqu'elles ont été taillées, les éme-
raudes naissent pourtant dans des
gisements que tout oppose (âge,
genèse). Et c'est à une échelle très fine
qu'il faut rechercher la marque indélé-
bile de leurs origines.

L'émeraude est la variété verte (et
très rarement transparente) d'un miné-

ral somme toute assez banal, le béryl, un
silicate d'aluminium et de béryllium
(voir l'encadré « La structure cristallo-
chimique de l'émeraude »). Sa couleur
est due à la présence d'infimes quantités
de chrome et de vanadium.

Les traces de fer et d'alcalins contri-
buent pour leur part à accroître la
gamme des variétés et tonalités de cette
gemme. L'émeraude est un minéral rare
car le chrome, le vanadium et le fer
d'une part, le béryllium et les alcalins
d'autre part, ont des comportements
diamétralement opposés au cours de
l'évolution du globe terrestre : les pre-
miers ont une affinité marquée pour le
manteau ; les seconds pour la croûte



continentale. La formation d'un gisement d'émeraudes résulte donc d'un concours de circonstances exceptionnel permettant dans le temps et dans l'espace la réunion et l'assemblage de ces éléments chimiques. Dès lors, l'étude du contexte géologique revêt une importance fondamentale. D'autant que les gemmologues ont toujours considéré cette pierre précieuse sous le seul angle minéralogique⁽¹⁾.

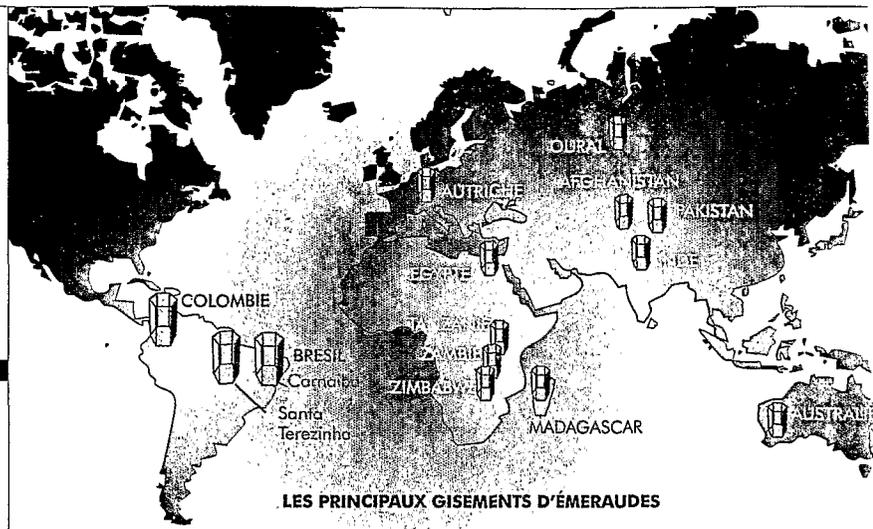
(1) D. Schwartz, « Esmeraldas-*Imprensa Universitaria UFOP*, Ouro Preto, Brazil, 450 p., 1987.

(2) A. Cheilletz *et al.*, *Earth and Planetary Science Letters*, 120, 473, 1993.

(1) *La Recherche* a publié : Gilbert Feraud, « La datation par sonde laser », n° 209, avril 1989.

Les réactions minéralogiques au contact des granites ont produit au Brésil, il y a 2 milliards d'années, les émeraudes les plus vieilles de la Terre

Dans l'état actuel de nos connaissances, on distingue deux grands types de gisements — les brésiliens et les colombiens — qui témoignent d'autant de processus géologiques. Les datations faites sur les gisements brésiliens grâce aux méthodes radiochronologiques potassium-argon et argon 40-argon 39⁽¹⁾ montrent qu'ils se sont formés au cours de deux épisodes, les uns voici 2 milliards d'années, les autres



entre 760 et 510 millions d'années⁽²⁾. Les émeraudes ont cristallisé dans des roches constituées uniquement de phlogopite, un silicate très riche en magnésium, de la famille des micas noirs ; d'où leur appellation familière « d'émeraudes de micas ». Ces roches particulières (dites « phlogopitites ») résultent de la transformation à l'état solide, sous l'effet d'un fluide alcalin chaud (400 à 600 °C), de roches basiques voire ultrabasiques.

Figure 1. L'essentiel de la production d'émeraudes gemme (90 %) provient aujourd'hui des gisements de Colombie et du Brésil.

On désigne ainsi des roches pauvres en silice et riches en magnésium et fer : la péridotite (composée majoritairement de deux silicates de magnésium et de fer : l'olivine et pyroxène), leur équivalent altéré (serpentinite) et métamorphisé (amphibolite-pyroxénite) ou ...

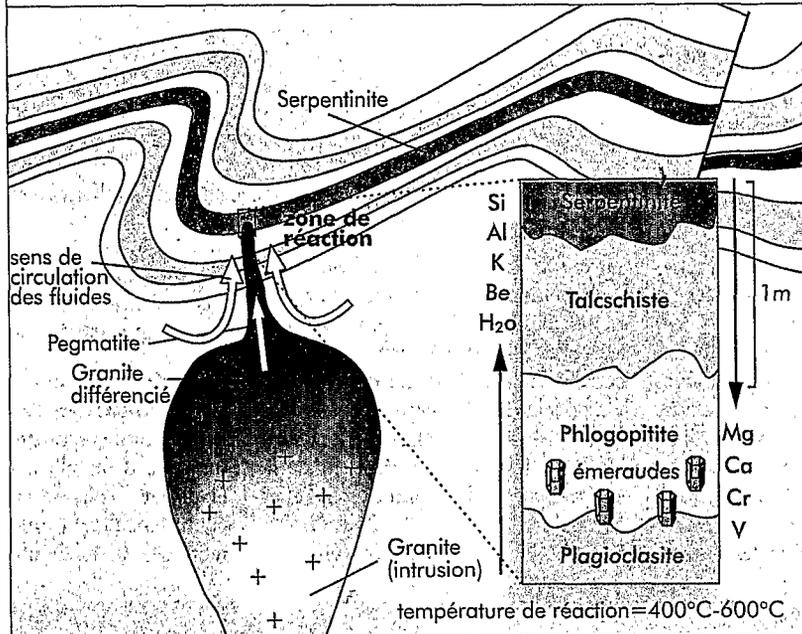


... encore certains schistes et grauwakes* que l'on regroupe en raison de leur couleur sous le terme de « roches vertes ».

Prenons l'exemple des gisements de Carnaíba, à 400 kilomètres au nord-ouest de Salvador de Bahia qui, jusqu'en 1978, ont assuré la totalité de la production d'émeraude brésilienne. Il y a environ 2 milliards d'années, une

lement en contact sont tels qu'ils entraînent une mobilisation générale des éléments chimiques : ceux-ci sont libérés et transportés par les fluides hydrothermaux issus du dégazage des magmas et de l'infiltration d'eaux de l'environnement. A l'instar des ions qui se déplacent d'une électrode à une autre sous l'effet d'une différence de

larités chimiques de l'émeraude évoquées précédemment : granite, pegmatite et fluides chauds introduisent le potassium, l'aluminium et le béryllium dans un milieu où abonde le fer, le magnésium et le chrome, permettant du même coup la cristallisation synchrone de nouvelles espèces silicatées dont la phlogopite et l'émeraude.

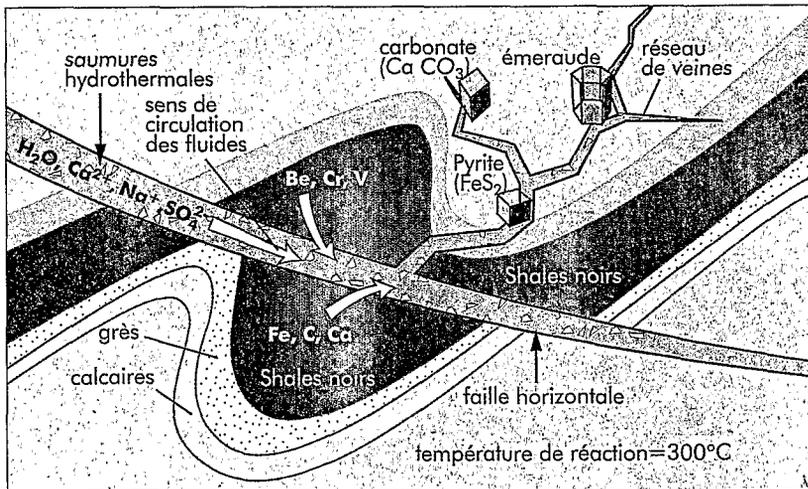


▲ Figure 2. Les gisements de type brésilien résultent de la transformation à l'état solide de roches vertes (les serpentinites), conséquence de l'intrusion d'une poche de pegmatite et des fluides associés. Les écarts de composition et de température entre les deux types de roches provoquent la migration des éléments chimiques de part et d'autre de la zone de contact. On voit apparaître des bandes de composition minéralogique très contrastées, parallèles les unes aux autres et symétriques par rapport à la zone de contact. Les émeraudes précipitent dans les bandes de phlogopite (roches uniquement constituées de phlogopite, un mica noir magnésien) et de plagioclase (roche composée de plagioclase) qui résulte de la transformation de la pegmatite.

*LA GRAUWAKE est une roche sédimentaire qui contient des minéraux argileux, des grains de quartz et de feldspath, et de nombreux débris rocheux provenant de roches magmatiques basiques et de schistes.

*LES PEGMATITES se présentent en bordure des massifs de granite, le plus souvent en filons. Elles sont composées de cristaux centimétriques voire décimétriques de quartz, feldspath et micas. Ces roches cristallisent avec le granite, à partir d'un liquide extrêmement riche en silice, en alcalins et surtout en fluides contenant des éléments rares tels que le lithium, le césium, le fluor, le béryllium, etc.

chaîne de montagnes comparable à nos Pyrénées centrales traversait cette partie du Brésil. Une bulle de liquide magmatique riche en silice et en alumine en provenance des zones profondes de la croûte continentale s'est alors frayée un chemin jusqu'aux vieilles roches vertes de la ceinture de la Serra de Jacobina (2,7 à 2 milliards d'années) (fig. 2)^(3,4). En bordure, ce magma granitique cristallise sous forme de pegmatites*. Et c'est là qu'a lieu une réaction chimique très spectaculaire. Les écarts de composition et de température entre les deux familles de roches mises brutamente



potentiel, les éléments chimiques vont ainsi migrer sur quelques mètres de part et d'autre de la zone de réaction. Et se reconcentrer plus loin. Au terme de ce processus, qui constitue la « métasomatose » (du grec meta, « au-delà de » et soma, « corps »), les roches situées en bordure du granite sont totalement transformées et de nouveaux assemblages minéralogiques se forment, en général de grosse taille (supérieure au centimètre) (fig. 2). La durée de ce processus, bien que difficile à estimer, est probablement de l'ordre de plusieurs centaines d'années. On comprend mieux dès lors les particu-

Contrairement aux cristaux brésiliens, les prismes colombiens sont souvent limpides et pauvres en inclusions minérales

Dans certains gisements brésiliens cependant, l'existence du couple émeraude-phlogopite n'est pas liée à la mise en place d'un granite ou d'une pegmatite⁽⁵⁾. C'est la présence de cisaillements dans la croûte continentale qui permet aux fluides alcalins circulant dans les parties profondes de la croûte de communiquer avec les roches vertes hôtes de la minéralisation. Tel est le cas du site de Santa Terezinha dans l'Etat de Goiás. Découvert en 1981, ce gisement est aujourd'hui le plus important du Brésil et peut-être du monde si l'on considère la quantité d'émeraude extraite — quelque 155 tonnes entre

▲ Figure 3. Les gisements colombiens sont issus en partie du cycle général de maturation de la matière organique du bassin sédimentaire de la Cordillère orientale, d'où leur association spatiale avec les champs pétrolifères. Ils sont le produit d'une suite de réactions chimiques entre des saumures alcalines et des roches argileuses riches en matière organique. Ces réactions se sont déroulées il y a 65 millions d'années, puis entre 38 et 32 millions d'années lors d'épisodes de déformation du bassin. Sous la contrainte, des plis se sont développés, des réseaux de fractures se sont ouverts, permettant aux saumures de circuler et d'interagir avec la matière organique. C'est là que les émeraudes ont cristallisé.

1981 et 1988. Malheureusement les cristaux ne sont pas de très bonne qualité et moins de 1% sont de qualité gemme.

Le contexte géologique des gisements colombiens est tout autre. D'abord, ils sont plus récents : 65 millions d'années (à la limite du Crétacé et du Tertiaire) pour les uns⁽⁶⁾; et entre

quelques pour cent à plus de 50%). Et les pièces parfois impressionnantes : « La Emilia », un cristal d'environ 6 000 carats (soit 1,2 kilogramme), a été exhumée en 1969. La raison de cette qualité exceptionnelle? Une croissance sans contraintes. Les émeraudes se sont en effet développées dans des cavités, sortes de petites

d'analyses, nous ont permis de proposer un autre scénario⁽⁶⁾. Il s'appuie sur plusieurs faits, certains originaux, d'autres connus depuis longtemps mais mal interprétés du fait d'une connaissance rudimentaire du cadre géologique. Parmi ces faits : l'existence dans les cristaux d'émeraude de microscopiques cavités à l'intérieur desquelles sont pié-

(3) L. Rudowski et al., C.R. Acad. Sci. Paris, t. 301, série II, 1129, 1987.

(4) G. Giuliani et al., Chronique de la recherche minière, n° 526, 17, 1997.

(5) G. Giuliani et al., Mineralium Deposita, 25, 57, 1992.

(6) A. Cheillett et al., C.R. Acad. Sci. Paris, t. 324, série IIa, 369, 1997.

(7) A. Cheillett et al., Econ. Geol., v. 89, 361, 1994.

(8) A. Cheillett et G. Giuliani, Mineralium Deposita, 31, 359, 1996.

(9) G. Giuliani et al., C.R. Acad. Sci. Paris, v. 314, série II, 269, 1992.

(10) G. Giuliani et al., Eur. Jour. of Min., 7, 165, 1995.

LA STRUCTURE CRISTALLOCHIMIQUE DE L'ÉMERAUDE

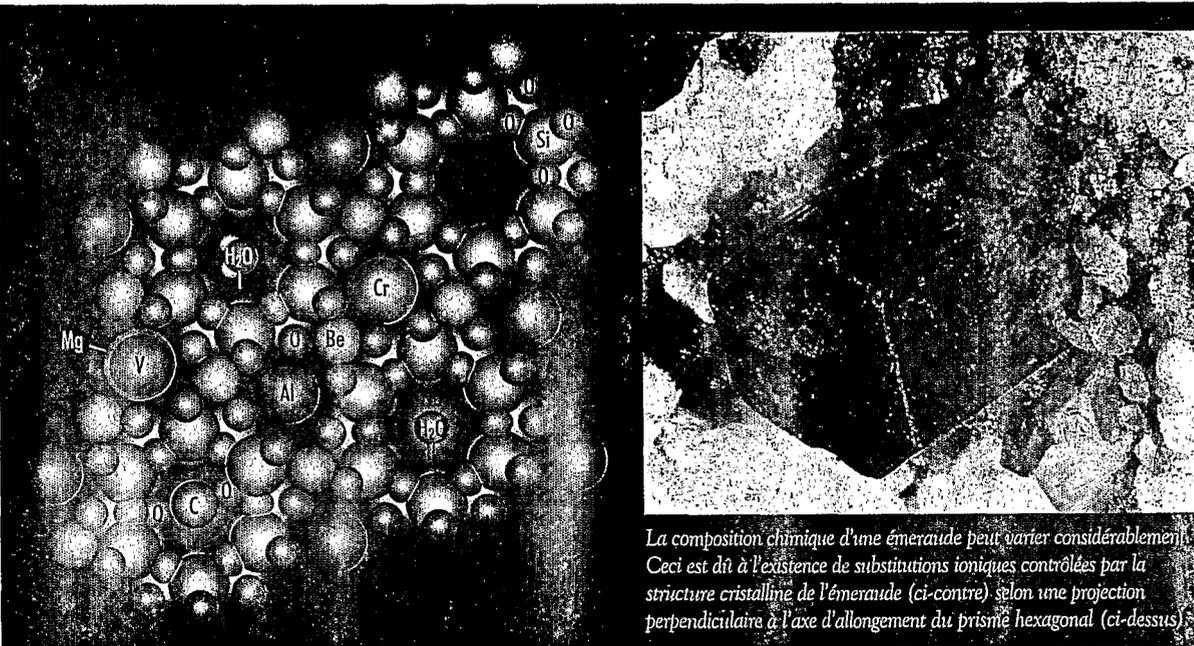
L'émeraude est la variété verte du béryl, un silicate d'aluminium et de béryllium ($\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$). Si on coupe un prisme de béryl selon son plan hexagonal, on observe une succession d'anneaux de six tétraèdres de silice (SiO_4^{4-}) reliés entre eux par des ions aluminium (Al^{3+}) et béryllium (Be^{2+}). Dans l'émeraude, l'aluminium est partiellement remplacé par du chrome (Cr^{3+}) ou du vanadium (V^{3+}) et, plus rarement, par du magnésium (Mg^{2+}) et du fer (Fe^{3+}). Parfois, du lithium (Li^+) remplace le béryllium tandis que l'aluminium se substitue au silicium.

L'assemblage des tétraèdres de silice ménage

dans l'axe d'allongement du prisme des « canaux » que l'émeraude va mettre à profit lors de sa croissance pour compenser les déficits de charge introduits par les substitutions dans sa charpente silicatée : des ions alcalins, sodium (Na^+), potassium (K^+), lithium (Li^+), césium (Cs^+), ou des éléments volatils puisés dans le fluide nourricier (eau, gaz carbonique et gaz rares) seront incorporés ainsi à la structure⁽¹⁷⁾. Conséquences : la composition chimique des émeraudes est extrêmement variable. Cette variabilité peut être mise à profit pour identifier les différentes familles d'émeraudes. En taillant le cristal d'émeraude, le lapi-

daire valorisera ses qualités naturelles. La taille est une opération délicate qui doit tenir compte des particularités physiques (forme du cristal, fissures, inclusions, variations de couleur, etc.) et surtout optiques du minéral. L'existence de deux indices de réfraction de la lumière dans les cristaux d'émeraude, l'un parallèle à l'axe d'allongement du prisme (np), l'autre contenu dans le plan de la section hexagonale (ng), provoque en effet un phénomène de dichroïsme : une tonalité vert-bleu (« froide ») apparaît si la taille est parallèle à np, vert-jaune (« chaude ») si la coupe est parallèle à ng. Après la taille, le volume du cristal a diminué d'au moins 50%.

Infographie B. Sabot, émeraude de Mizo, Colombie, coll. Ecoles des Mines de Paris, cliché J.-M. Le Cléac'h



La composition chimique d'une émeraude peut varier considérablement. Ceci est dû à l'existence de substitutions ioniques contrôlées par la structure cristalline de l'émeraude (ci-contre) selon une projection perpendiculaire à l'axe d'allongement du prisme hexagonal (ci-dessus).

38 et 32 millions d'années (limite Eocène-Oligocène) pour les autres⁽⁷⁾. Ils sont regroupés sur les deux versants sylvestres de la Cordillère orientale, entre 500 et 2 000 mètres d'altitude, le long de deux bandes parallèles, à proximité des champs pétrolifères des Llanos et de la Magdalena moyenne. Les émeraudes sont parmi les plus belles : contrairement à leurs cousines brésiliennes, les prismes sont limpides et pauvres en inclusions minérales. La proportion de qualité gemme est d'ailleurs nettement plus importante bien que très variable d'un chantier à l'autre (de

géodes, à l'intérieur de veines de carbonates elles-mêmes incluses dans des roches argileuses, les shales noirs* du Crétacé inférieur.

La genèse des émeraudes colombiennes a toujours posé problème. En 1994, l'Engineering and Mining Journal constatait encore que « des générations de géologues avaient été incapables de produire un modèle génétique efficace ». Par analogie avec les autres gisements du monde, les granites furent longtemps suspectés d'être à l'origine de ces fabuleux trésors colombiens. Il n'en est rien. Une dizaine d'années d'expéditions et

gés des cristaux de sel (NaCl ou halite), dont les particularités isotopiques indiquent qu'ils proviennent d'évaporites, c'est-à-dire de dépôts salifères^(9,10,11).

Comment interpréter cette observation (fig. 3) ? Faisons un bref retour sur les événements qui se sont déroulés depuis 65 millions d'années. A cette époque, la Cordillère orientale n'existait pas encore. A la place, il y avait un vaste bassin où s'étaient accumulés plusieurs milliers de mètres de sédiments continentaux et marins dont quelques niveaux d'évaporites. A partir de 65 millions d'années, la Cordillère orientale

*SHALE NOIR
Terme anglais qui désigne une roche argileuse à débit schisteux riche en matière organique.

va subir plusieurs épisodes de déformation et de compression en rapport avec l'ouverture de l'Atlantique poussant l'Amérique du Sud vers l'ouest. Deux de ces épisodes (vers 65 millions et 38-32 millions d'années) sont responsables de la formation des gisements d'émeraudes.

Les fausses émeraudes sont de plus en plus difficiles à identifier tant les nouveaux procédés de synthèse artificielle sont sophistiqués

Les niveaux de moindre résistance mécanique, comme les shales noirs du Crétacé inférieur, se désolidarisent : d'immenses pans de roches sédimentaires se chevauchent et s'empilent⁽¹²⁾. Les fluides hydrothermaux, qui proviennent pour l'essentiel de l'infiltration des eaux superficielles, vont alors migrer à la faveur de ces discontinuités vers les profondeurs du bassin et se réchauffer (leur température peut atteindre 300 °C). Ils dissolvent progressivement l'anhydrite (CaSO₄) et le sel gemme (NaCl) qu'ils rencontrent çà et là dans les niveaux d'évaporite. Lorsque ces saumures alcalines entrent en contact avec les shales noirs du Crétacé inférieur c'est le choc.

Et ce pour deux raisons. *Primo*, ces shales contiennent jusqu'à 3% de matière organique d'où leurs très fortes propriétés réductrices. *Secundo*, ces shales sont des roches « poubelles » où sont concentrés de nombreux éléments chimiques : le fer (entre 4 et 8%), le calcium (sous forme d'intercalations carbonatées) et aussi des éléments présents à l'état de traces tels que le béryllium (entre 3 et 4 ppm*), le chrome, (entre 100 et 170 ppm), le vanadium (entre 140 et 300 ppm) et les terres rares. Au moment du contact, les sulfates d'origine évaporitique sont réduits en hydrogène sulfuré tandis que la matière organique des shales noirs est oxydée en gaz carbonique.

Cette réaction chimique, connue sous le nom de thermoréduction des sulfates, produit d'importantes quantités d'hydrogène sulfuré mais aussi d'ions hydrogénocarbonates (HCO₃⁻), lesquels interagissent avec le fer et le calcium extraits des shales noirs, provoquant la précipitation des carbonates (calcite) et d'un sulfure de fer, la pyrite. La matière organique reprécipite dans les veines sous forme de graphite désordonné. Béryllium, chrome, vanadium, sont extraits des shales noirs au cours de la thermoréduction des sulfates, et précipitent sous forme d'émeraude et d'un carbonate de terres rares, la parisite. Les

minéralisations colombiennes sont donc issues en partie du cycle général d'évolution de la matière organique du bassin sédimentaire de la Cordillère orientale, d'où leur association spatiale avec les champs pétrolifères.

On a longtemps cru que les émeraudes colombiennes étaient uniques. Mais lors du dernier congrès de l'Industrie minérale canadienne qui s'est déroulé à Vancouver au printemps dernier, des chercheurs américains ont annoncé avoir découvert une magnifique émeraude de trente carats dans des shales noirs vieux de 950 millions d'années des monts Uinta dans l'Utah (Etats-Unis).

Ce type de gisements est tout de même exceptionnel. Du moins en comparaison des gisements de type brésilien que l'on retrouve en Inde, en Zambie, au Zimbabwe, en Tanzanie, à Madagascar, en Australie ou encore dans l'Oural, pour ne citer que les principaux pays producteurs d'émeraudes : à Madagascar par exemple, un énorme groupe de 127 émeraudes agglomérées pesant 76 kg a récemment été mis au jour. Le petit gisement de Franqueira en Galice (Espagne) associé à des pegmatites vieilles de 300 millions d'années appartient également à ce type. De même que ceux du Pakistan.

Dans ce cas précis, on retrouve, comme au Brésil, des gisements associés à la mise en place de granite et de pegmatites (Khaltaro dans le massif de Nanga Parbat-Hamarosh)⁽¹³⁾, et au fonctionnement d'immenses cisaillements (gisements de Swat dans la région de Mingora au nord-ouest du pays)⁽¹⁴⁾.

La genèse des émeraudes afghanes de la vallée du Panjshir est encore énigmatique en raison du contexte géopolitique de cette région⁽¹⁵⁾. Redécouvertes lors de l'occupation soviétique, elles font aujourd'hui l'objet d'une exploitation artisanale (lorsque les bombes le permettent) et d'une commercialisation assez active : la production a été estimée à 10 millions de dollars en 1990, certaines émeraudes de très belle qualité pouvant atteindre une valeur de 100 000 dollars le carat. Leur étude géologique et géochimique est actuellement en cours et devrait permettre en particulier d'apporter une réponse concernant l'origine de certains des magnifiques bijoux ornant les couronnes des maharadjahs indiens.

Une fièvre nouvelle s'est emparée du monde des « esmeralderos ». De nouveaux gisements sont découverts, d'autres sont mis en exploitation, notamment en Afrique de l'Est et à Madagascar, les études des gisements

indiens reprennent (en collaboration entre le Geological survey of India et le bureau de recherches géologiques et minières en France), de nouveaux investisseurs étrangers s'intéressent aux gisements colombiens. Mais cette fièvre a aussi gagné les faussaires.

Les « fausses » émeraudes, souvent magnifiques, sont de plus en plus difficiles à identifier tant les nouveaux procédés de synthèse artificielle sont sophistiqués. Et il est temps pour les scientifiques d'établir une véritable carte d'identité des émeraudes permettant aux vendeurs de valoriser au mieux leur produit par la certification, et aux acheteurs d'assouvir leur légitime souci d'authenticité.

Cette tâche, à laquelle nous nous sommes attelés depuis quelques années, vise ainsi à déterminer aussi précisément que possible le milieu de dépôt et les conditions de formation de ces pierres précieuses dans les différents sites mondiaux. L'objectif : établir une banque de données intégrant des informations sur le gisement, son âge, etc., qui viendrait compléter les catalogues actuels des principaux organismes de certification comme la chambre de commerce et d'industrie de Paris, l'institut Gübelin en Suisse ou encore le Gemological Institute of America, aux Etats-Unis.

Les gisements de Colombie exploités intensivement depuis une quinzaine d'années sont actuellement en cours d'épuisement

Les premières mesures d'isotopes stables (oxygène et hydrogène) effectuées sur les fluides piégés dans les structures cristallines autorisent les plus grands espoirs⁽¹⁶⁾ : elles pourraient, en complément d'autres analyses d'éléments en traces, permettre une caractérisation encore plus fine des différentes familles d'émeraudes en rapport avec leur contexte géologique. Ces études se font actuellement dans les laboratoires nancéiens. Les bénéfices d'une telle démarche sont évidents. Tout d'abord pour valoriser le produit : des mélanges de pierres d'origines différentes (et quelquefois de synthèse) sont en effet introduits dans les lots aux différents stades de la commercialisation. Ensuite, pour rationaliser et moderniser les exploitations actuelles. Les gisements de Colombie par exemple, exploités intensivement depuis une quinzaine d'années, sont actuellement en cours d'épuisement.

A.C. et G.G. ■

*ppm :
partie par million.

(11)
T.L. Ottaway et al., *Nature*,
369, 552, 1994.

(12)
B. Laumonier et al.,
C.R. Acad. Sci. Paris,
323, série IIa, 705, 1996.

(13)
B.M. Laurs et al., *Canadian
Mineralogist*, 34, 1253, 1996.

(14)
M. Arif et al., *Mineralium
Deposita*, 31, 255, 1996.

(15)
G. Bowersox et al., *Gems
and Gemology*, 27, 26, 1991.

(16)
G. Giuliani et al.,
International Geology Review,
sous presse.

(17)
B. Charoy et al., *American
Mineralogist*, 81, 395, 1996.

RECHERCHE

L'origine solaire des orages magnétiques

p 32

DOSSIER

Alzheimer LA MALADIE DU SIECLE

p 57



La double origine
des
ÉMERAUDES

p 48

PN 23 ex 1
33 037. 1907

LA MATHÉMATIQUE DES BULLES

p 42

A qui appartient la découverte de l'électron?

p 80

ISSN : 0029-5671

T 1108. 303 - 38,00 F

