

les notes sont inférieures à une valeur seuil inférieure sont généralement refusés. Le comité évalue ensuite, plus subjectivement, les qualifications des postulants qui n'ont pas été admis par les méthodes statistiques prédictives. En France, les dossiers ne sont pas sélectionnés de cette façon statistique, mais par des évaluations... peut-être plus subjectives.

Les méthodes objectives d'établissement des seuils ont aussi été sous-utilisées dans l'industrie aéronautique. Lors de l'entretien des avions, on doit rechercher les défaillances graves, mais rares, telles que des fissures dans les ailes. Quand un diagnostic d'aile fissurée n'est pas fait, les conséquences sont catastrophiques : de nombreux passagers meurent si l'avion s'écrase. En revanche, une décision fausement positive met inutilement l'avion hors service, ce qui perturbe le service et coûte cher aux compagnies. À première vue, les bénéfices et les coûts sont en faveur d'un seuil «laxiste», les vies n'ayant pas de prix. Cependant, comme ces fissures sont rares, un seuil «laxiste» entraînerait un nombre incalculable de faux positifs. Aujourd'hui, aucune technique statistique ne résout le dilemme.

Les utilisateurs d'alarmes de cockpits (comme les compagnies aériennes ou l'armée) n'ont pas non plus réussi à choisir quels seuils de décision adopter. En vol, les alarmes se déclenchent en de multiples circonstances : lorsque les appareils de mesure enregistrent qu'un autre avion est trop proche, quand l'avion se rapproche trop du sol, quand un moteur est en panne ou quand un vent violent balaie la piste d'atterrissage. Toutefois, ces alarmes sonnent de façon intempestive, en raison du manque de précision des détecteurs ou du laxisme de leurs seuils. Aussi les pilotes hésitent-ils à tenir compte de ces alarmes trop fréquentes ; des interventions systématiques risqueraient d'ailleurs de perturber les vols. Toutefois, en raison du grand nombre de fausses alarmes, les pilotes risquent de finir par les ignorer ou par réagir trop lentement à une véritable urgence.

Les méthodes statistiques prédictives augmentent souvent la pertinence des diagnostics, et les formules pour établir des seuils de partage amélioreraient l'utilité de ces choix. Ces outils ont encore d'autres avantages : en standardisant les analyses sur lesquelles se fondent les diagnostics, les méthodes

Une question de goût

Les architectes et les amateurs de vin ont trouvé deux applications amusantes des méthodes statistiques prédictives. La «méthode architecturale», qui s'applique à des salles d'opéra, fut mise au point grâce à des chefs d'orchestre qui avaient noté la qualité sonore de 23 salles. Puis des ingénieurs acousticiens mesurèrent physiquement différentes propriétés acoustiques (telles que le délai entre les sons directs et les sons réfléchis, la diffusion des ondes sonores provoquée par les irrégularités du plafond et des murs) de chacune de ces 23 salles. Les analyses statistiques ont ensuite révélé quelles sont les caractéristiques des meilleures salles d'opéra. On a alors amélioré la conception de nouvelles salles.

En œnologie, une méthode statistique prévoit la qualité future des Bordeaux rouges (qualité mesurée par leur prix de vente aux enchères) à partir d'un test sur des échantillons de vins encore jeunes et imbuables. Auparavant, les experts prévoyaient la qualité future en sentant et en goûtant le nouveau produit. Il y a dix ans, les œnologues ont constaté que les années marquées par un hiver humide, des mois d'août et de septembre secs et une période de croissance chaude produisent d'excellents vins.

Ils ont alors formulé l'«équation bordelaise», une méthode statistique prédictive qui combine les conditions météorologiques et les années de vieillissement pour définir la probabilité qu'un vin soit excellent dans plusieurs années. Cette équation explique 83 pour cent des divergences de prix des vins rouges de Bordeaux à maturité, mis aux enchères. Pourtant cette équation, suscita une vive réaction des œnologues, qui la décrièrent violemment dans un article.



Le nouvel opéra de Tokyo, dont les qualités acoustiques ont été validées par des méthodes statistiques de prévision du son.

Avec l'aimable autorisation de Tai Architects, Yamagisawa, Tokyo

statistiques facilitent l'identification des paramètres importants. Elles fournissent aux décideurs des arguments faciles à communiquer et qui leur permettent de préciser de vagues impressions. De surcroît, elles facilitent la formation des débutants.

Ces outils sont parfois accueillis avec réticence, notamment quand les experts craignent qu'ils ne les remplacent. Les médecins également veulent garder la maîtrise de leurs diagnostics et de leurs recommandations, et donner un compte rendu argumenté de leur décision. Les résultats d'une méthode statistique prédictive sont parfois difficiles à prendre en compte, surtout quand la logique qui sous-tend l'analyse n'est pas évidente.

Nous comprenons ces préoccupations, mais les bénéfices apportés par les outils statistiques justifient certainement que les personnes amenées à prendre des décisions, qui ont la vie d'autrui entre leurs mains, y réfléchissent.

John SWETS est spécialiste de la «politique» de santé américaine et radiologue à Boston. Robyn DAWES est professeur de sciences sociales à l'Université de Carnegie Mellon. John MONAHAN dirige l'association de recherche Loi-santé mentale de la Fondation MacArthur.

A.W. PARTIN et al., *Combination of Prostate-Specific Antigen, Clinical Stage and Gleason Score to Predict Pathological Stage of Localized Prostate Cancer*, in *Journal of the American Medical Association*, vol. 277, n° 18, pp. 1445-1451, 14 mai 1997.

Kenneth A. FREEDBERG et Jeffrey H. SAMET, *Think HIV : Why Physicians Should Lower their Threshold for HIV Testing*, in *Archives of Internal Medicine*, vol. 159, n° 17, pp. 1994-2003, 27 septembre 1999.

John A. SWETS, Robyn M. DAWES et John MONAHAN, *Psychological Science Can Improve Diagnostic Decisions*, in *Psychological Science in the Public Interest* (supplément à *Psychological Science*), vol. 1, n° 1, pp. 1-26, mai 2000.

La route des émeraudes anciennes

GASTON GIULIANI • MICHÈLE HEUZÉ • MARC CHAUSSIDON

Grâce à une sonde ionique, on détermine aujourd'hui la provenance des émeraudes sans les détériorer. Les géologues et gemmologues ont analysé des pierres historiques et reconstitué la route des émeraudes anciennes.

Les premières émeraudes ont-elles été ramassées en Égypte, en Bactriane (la région recouvrant le Nord de l'Afghanistan, le Sud du Turkménistan, de l'Ouzbékistan et du Tadjikistan actuels) ou en Inde du Sud ? Aujourd'hui, les géologues aident les historiens à reconstituer la chronologie de la découverte des gisements d'émeraudes.

En occident, les premiers objets décorés d'émeraudes apparaissent au IV^e siècle avant notre ère, dans l'Empire grec, sous le règne d'Alexandre le Grand. Puis, l'un de ses généraux fonde la dynastie ptolémaïque en Égypte, où les mines d'émeraudes commencent à être exploitées. Bien qu'elles restent assez rares, ces gemmes apportent une touche de vert à la bijouterie, qui les associe avec des perles et d'autres pierres, tels les grenats. Des bracelets allient les émeraudes à des motifs égyptiens, tels les fleurs de lotus et les serpents, et des motifs grecs, tels les cygnes et les couronnes de pampres. À partir du II^e siècle avant notre ère, cette gemme est à la mode dans l'Empire romain : les gisements d'Égypte, qui vient d'être conquise, sont exploités de façon intensive. Les émeraudes, désormais abondantes, s'égrènent le long des colliers, seules ou avec des perles. Elle forment des grappes ou des mosaïques sur les boucles d'oreilles, ornent les bracelets et les pendentifs en or, travaillés selon une technique d'ajourage en dentelle (*l'opus interasile*) très prisée des Romaines.

Dans l'Antiquité, on ne taille pas les émeraudes en facettes. On polit

les angles des cristaux pour renforcer leur éclat et améliorer leur transparence. Après la division de l'Empire romain, au V^e siècle, l'orfèvrerie byzantine est richement ornée de gemmes et notamment d'émeraudes, au contraire du reste de l'Europe, où les grenats apportés par les hordes barbares sont omniprésents. Au Moyen Âge, les émeraudes qui rehaussent l'orfèvrerie religieuse de touches de couleur sont souvent des réemplois de pierres de bijoux antiques. Puis, à la Renaissance, les émeraudes colombiennes envahissent l'Europe : les Espagnols et les Portugais en font le commerce dans le monde entier, jusqu'en Inde, où les maharajas les apprécient.

Les émeraudes de Bactriane

Les recherches sur l'histoire des gemmes nécessitent autant de connaissances minéralogiques qu'historiques. Deux géologues (Gaston Giuliani et Marc Chaussidon) et une historienne du bijou (Michèle Heuzé) ont collaboré pour retrouver la route des émeraudes anciennes. Depuis 1998, les géologues disposent d'une sonde ionique à Vandœuvre, près de Nancy (*voir l'encadré de la page 64*) : à plusieurs reprises, cette sonde a confirmé l'origine d'émeraudes historiques, mais, plus intéressant encore, elle a permis de reconstruire les pans oubliés de l'histoire de ces gemmes et de faire tomber certaines légendes.

Au IV^e siècle avant notre ère, le philosophe grec Théophraste rapporte les récits d'Alexandre le Grand, qui

fait consigner tout ce qu'il voit, notamment les us et coutumes des pays qu'il traverse lors de ses conquêtes (son empire s'étend jusqu'en Bactriane). Alexandre doit cette soif de connaissance à son précepteur, Aristote, dont Théophraste, le disciple, écrit : «L'émeraude qui servait à orner des vases d'or était portée en bague, taillée de forme concave pour que la lumière puisse y rassembler ses rayons. [...] Les émeraudes dont on se sert pour orner les coupes et autres vases d'or viennent de Bactriane vers le désert ; on y va à cheval pour les chercher au temps des vents étésiens ou des vents d'Est annuels : on les voit dans ce temps-là parce que les sables sont agités avec violence par ces vents. Cependant, les pierres que l'on y trouve ne sont pas grosses» (les vents étésiens sont des vents violents, tels ceux qui soufflent en Méditerranée orientale pendant l'été). En l'absence de preuves tangibles de l'existence des gisements de Bactriane, les historiens ne croyaient plus aux vieux écrits de Théophraste, jusqu'à ce que l'on analyse, avec la sonde ionique, une boucle d'oreille gallo-romaine retrouvée dans l'Ain, à Miribel, et conservée au Muséum national d'histoire naturelle de Paris.

Les écrits de Théophraste sont cités en référence jusqu'au XIII^e siècle, mais,

1. LES ÉMERAUDES DE CE TRÉSOR ROMAIN du III^e siècle, découvert à Eauze, dans le Gers, proviendraient des gisements égyptiens, exploités de façon intensive dans l'Antiquité (selon les analyses destructives menées à la fin des années 1980 au laboratoire de géochimie de l'Université Pierre et Marie Curie).

au XVII^e siècle, Jean-Baptiste Tavernier, un grand courtier amateur de gemmes voyageant en Asie, ne trouve aucune trace d'émeraude et en nie toute existence à l'Est : «C'est une erreur ancienne. [...] Jamais l'Orient

n'en a produit, ni dans la terre ferme ni dans les îles et qu'en ayant fait une exacte perquisition dans tous mes voyages, personne n'a jamais su marquer aucun lien de l'Asie où elle se trouve.» Dans les années 1960, on

pense toujours que les émeraudes de Bactriane sont un mythe.

Or, dès 1958, un berger découvre au Pakistan des gisements qui seront exploités à partir des années 1960. Entre 1970 et 1980, on découvre





2. CETTE ÉMERAUDE, EXCEPTIONNELLE PAR SA TAILLE (3 centimètres sur 2,4 centimètres), est d'origine autrichienne. Il s'agit peut-être de la «table» d'émeraude figurée sur l'aquarelle de droite, au centre du lys frontal de la Sainte Couronne (aujourd'hui perdue). Si tel est le



cas, l'exploitation du gisement autrichien d'Habachtal remonterait au XII^e ou au XIII^e siècle. Cependant, le polissage de la pierre ressemble à celui que les Romains pratiquaient. Selon cette dernière observation, l'exploitation du gisement autrichien remonterait à l'Antiquité.

d'autres gisements en Afghanistan. On commence à soupçonner que Théophraste avait raison : la provenance pakistanaise de l'émeraude fixée sur la boucle d'oreille gallo-romaine du Muséum, que la sonde ionique a révélée, confirme la véracité de ses propos.

Cependant, aucun texte historique n'indique de quand date le ramassage de cette émeraude et la découverte du gisement pakistanaise. Dans l'Antiquité, on a peut-être ramassé des émeraudes en Afghanistan (si les vents étésiens dont parle Théophraste sont ceux de la vallée de Panjshir) à l'époque grecque, puis au Pakistan (d'où vient la boucle d'oreille analysée) à l'époque romaine. Cependant, en 329 avant notre ère, Alexandre le Grand se rend près de l'emplacement actuel des mines pakistanaises, en passant à quelques kilomètres de celui des afghanes. Dans cette région, il ne rapporte l'existence que d'un seul gisement, probablement le gisement pakistanaise, qui, selon cette hypothèse, aurait été connu dès l'époque grecque.

La seule certitude sur le gisement de Bactriane est sa nature alluvionnaire : les pierres que l'on ramassait dans le sable y avaient été déposées par le vent ou les cours d'eau. Ce gisement était probablement de maigre rendement : en Afghanistan et au Pakistan, les archéologues ont retrouvé des milliers de perles minérales, par exemple en agate, mais aucune en émeraude.

Le béryl vert de la boucle d'oreille gallo-romaine de Miribel a beaucoup voyagé. Dès le IV^e millénaire avant notre ère, la Bactriane, grâce à son or, à son argent mais, plus encore, à ses lapis-lazuli et ses grenats, est le point de départ d'une route commerciale vers les cités-États d'Irak, puis d'Égypte. La région joue un rôle primordial dans les relations entre l'Inde, le monde des steppes et l'Asie centrale. D'après l'historien romain Pline l'ancien, les caravanes empruntant la route de la soie pour aller vers la Chine ou revenir vers la Méditerranée mettent sept jours pour traverser la Bactriane. Lorsque les Parthes envahissent la région, elles passent par la mer Noire.

Les pierres transitent par les centres commerciaux majeurs, Begram, en Afghanistan, et Taxila, au Pakistan, avant de rejoindre l'Indus, l'océan Indien, le golfe Persique ou la mer Rouge. Est-ce ce long périple qu'a suivi la petite émeraude de la boucle d'oreille du Muséum ? Peut-être. À moins que les ambassadeurs des rois de Bactriane, qui se rendaient fréquemment en Europe à l'époque romaine, ne l'aient apportée dans leurs bagages.

L'autre lointaine provenance des émeraudes dans l'Antiquité est la Scythie. Pline affirme que l'on y trouve les plus belles. Où est ce gisement ? Au I^{er} siècle, la Scythie est un terme générique que les Romains emploient pour désigner les régions lointaines des barbares. Plus tard, à Byzance, on appelle Scythes tous ceux qui ne sont pas des

Grecs. Ainsi, le gisement scythe serait soit en Autriche, soit dans l'Oural. Pline n'emploie pas le terme de Germanie, ce qu'il aurait dû faire si le gisement était en Autriche. Toutefois, il n'est pas géographe. Dans l'Oural, dont le gisement n'est en exploitation que depuis 1830, les bijoux retrouvés lors des fouilles archéologiques et datant de l'époque romaine ne comportent aucune émeraude. La question reste ouverte, en attendant qu'un autre gisement soit découvert ou que les futures analyses permettent de répondre à cette question.

Les mines d'Égypte : seize siècles d'exploitation

L'origine pakistanaise de la boucle d'oreille gallo-romaine accrédite les récits de Théophraste, qui ne fait pas référence aux émeraudes d'Égypte. Ainsi, elles n'ont pas encore été découvertes : les datations qui font remonter l'exploitation des gisements égyptiens avant le passage d'Alexandre le Grand (parfois même 18 siècles avant notre ère) ne sont pas fondées. L'extraction commence au plus tard au III^e siècle avant notre ère, sous le règne de Ptolémée IV Philopator (de -221 à -203). Les nombreux bijoux découverts dans les ruines d'Herculaneum et de Pompéi témoignent de l'abondance des émeraudes.

Les lapidaires arabes citent quatre variétés d'émeraudes égyptiennes, dont les plus belles sont parfois, mais rarement, gravées des portraits de souverains ptolémaïques : en Scythie, sur les

centaines de gemmes gravées que l'on a retrouvées dans la région de la mer Noire, seules deux sont des émeraudes.

Jusqu'au XIII^e siècle, les émeraudes égyptiennes alimentent l'Europe, le Proche-Orient et l'Inde. Puis les mines d'Égypte s'épuisent et les pillages des anciens tombeaux de la région d'Alexandrie constituent un nouveau type de gisement! En Europe, cette pénurie conduit les orfèvres à réemployer des émeraudes antiques. L'emplacement des mines d'Égypte est peu à peu oublié : l'explorateur français Frédéric Caillaud les redécouvre en 1816, en Haute Égypte, sur la mer Rouge. Au XIX^e et XX^e siècles, on envisage de les réexploiter, mais elles ne sont pas rentables.

L'énigme du gisement autrichien

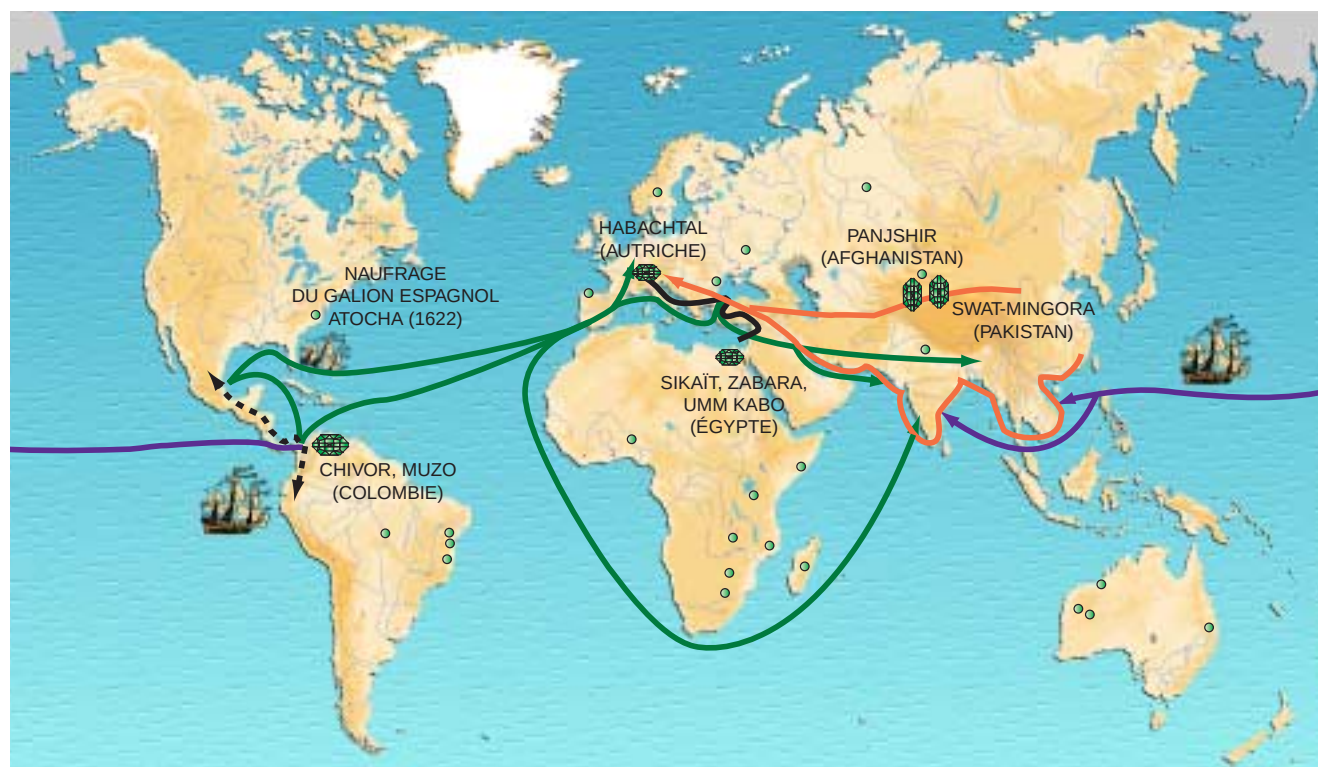
Les orfèvres du Moyen Âge ne connaissent-ils pas le gisement d'Habachtal? On a parfois affirmé, sans aucune preuve, que les Romains le connaissent déjà. La seule émeraude fixée sur un bijou romain (une boucle

d'oreille) et retrouvée en Autriche, de surcroît dans la région d'Habachtal, est vraisemblablement égyptienne, d'après les restes de la roche mère dans laquelle elle a cristallisé (voir l'encadré des page 62 et 63). L'archevêque de Salzbourg aurait exploité la mine au Moyen Âge. Cependant, le premier document qui la mentionne (une lettre de la veuve de l'archiduc Ferdinand Charles d'Autriche à son frère), ne daterait que de 1622 et le deuxième (une chronique minière) de 1727.

L'analyse de l'émeraude dite de la Sainte Couronne, conservée au Muséum national d'histoire naturelle (voir la figure 2), apporte un nouvel éclairage au débat. Les résultats sont compatibles avec trois provenances : l'Autriche, le Brésil et le Zimbabwe. Ces deux dernières sont exclues du fait de la découverte des gisements au XX^e siècle, postérieurement à la datation présumée de l'usage de la gemme. Celle-ci aurait orné le centre du lys frontal de la Sainte Couronne (voir la figure 2), datée du XII^e ou du XIII^e siècle. Cette pierre, exceptionnelle par sa taille (elle mesure 3 centimètres de longueur

et 2,4 centimètres de large) et par son poids (51,6 carats), a échappé aux ventes révolutionnaires. Sa provenance autrichienne bouleverse les données historiques, puisqu'elle prouverait l'existence d'une exploitation dès le Moyen Âge. De plus, son polissage, d'une qualité exceptionnelle, semble avoir été réalisé selon des techniques romaines employées du II^e au IV^e siècle : il laisse entrevoir une antériorité de son ramassage.

Avant que les conquistadores espagnols arrivent en Colombie, au XVI^e siècle, les autochtones exploitaient déjà les gisements d'émeraudes depuis au moins six siècles, comme l'attestent leurs bijoux. D'après leurs légendes, ils les auraient même découverts avant notre ère. Les Espagnols font le commerce des émeraudes qu'ils vont chercher chez les Incas, les Mayas, les Toltèques et les Aztèques (en Équateur, au Pérou et en Amérique centrale). Ils pillent les trésors des souverains locaux. Notamment, l'Espagnol Gonzalo Jimenez de Quesada en aurait rapporté près de 7 000 de son expédition en Colombie, en



3. LA ROUTE COMMERCIALE DES ÉMERAUDES : avant le XVIII^e siècle, seuls cinq gisements ont été exploités à des époques diverses (représentés par des cristaux verts). La route de la soie (en rouge) a longtemps été utilisée pour commercialiser les émeraudes d'Orient vers l'Europe. Les Grecs et les Romains ont rapporté les émeraudes égyptiennes en Europe, à partir du III^e siècle avant notre ère (en suivant la route en noir). Avant l'arrivée des conquistadores en Amérique du Sud, les autochtones y effectuaient déjà le

commerce des émeraudes entre le Pérou, l'Équateur et l'Amérique centrale (le long du trajet en pointillés noirs). Puis, les Espagnols en ont rapportées des milliers en Europe, d'où elles repartaient à bord des galions portugais vers les comptoirs indiens de Goa et de Diu (routes en vert). À partir de 1571, les Espagnols sont directement allés en Inde, en partant de Colombie (route maritime en violet). Depuis, de nombreux autres gisements ont été découverts dans le monde entier (points verts).

La formation des émeraudes

L'émeraude est la variété verte du beryl, un minéral constitué de silicium, d'oxygène, de béryllium et d'aluminium (de formule chimique $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$), qui cristallise dans le système hexagonal. Sa couleur verte est due à d'infimes quantités de chrome, et parfois de vanadium, qui remplacent des atomes d'aluminium. Les autres variétés de beryl colorées contiennent des substituants différents : la couleur bleu-vert de l'aigue-marine est due à la présence de fer, et celle de la bixbite, rouge, résulte de la présence de manganèse et de césium dans le réseau cristallin.

L'émeraude est un minéral rare, car le chrome (et le vanadium) et le béryllium ont des comportements géochimiques opposés : le chrome se concentre dans les roches issues du manteau (l'enveloppe de la Terre située sous la croûte continentale ou océanique), tandis que le béryllium a une affinité pour la croûte continentale et se concentre dans les magmas granitiques. La formation d'une émeraude résulte d'un concours de circonstances exceptionnelles qui réunit le chrome (et le vanadium) et le béryllium dans un même lieu. On distingue quatre types de gisements d'émeraudes.

Les gisements de type granitique (voir la figure), tel le gisement de Carnaíba, au Brésil (voir l'encart a), résultent de la rencontre entre une serpentinite, issue de la transformation d'une roche du manteau pauvre en silice (basique), mais riche en magnésium, en fer, en chrome et en vanadium, et un magma granitique riche en silice (acide) et en alumine. En remontant vers la surface terrestre, le magma fissure les roches basiques, notamment la serpentinite, et y injecte des filons de pegmatite : à mesure que le magma refroidit, ses divers constituants se solidifient les uns après les autres, formant une série de roches magmatiques. La pegmatite est «au bout» de cette chaîne : ses constituants (du quartz, du feldspath et du mica, dont les cristaux atteignent parfois des tailles de l'ordre du mètre) sont les derniers à se solidifier. Le refroidissement du magma libère un fluide hydrothermal constitué d'eau, de dioxyde de carbone et de sels, dont la température est comprise entre 400 et 600 °C. Ce fluide cir-

cule le long des zones de contact entre les filons de pegmatite et la serpentinite, dont il solubilise la plupart des constituants (notamment le béryllium de la pegmatite, et le chrome et le vanadium de la serpentinite). Il transforme ces roches respectivement en plagioclase (constituée de feldspath blanc riche en sodium) et en phlogopite (un schiste, c'est-à-dire une roche à structure feuilletée, contenant de la phlogopite : un mica magnésien de couleur marron). Ainsi, le chrome provenant de la dissolution de la chromite contenue dans la serpentinite, et le béryllium de la pegmatite, sont concentrés dans la phlogopite et dans la plagioclase, où les émeraudes cristallisent.

Au cours de leur croissance, ces émeraudes englobent des minéraux de leur matrice, notamment de la phlogopite, dans des cavités intracristallines : ces inclusions solides leur font perdre de leur transparence. Des petites gouttes de fluide hydrothermal sont également piégées dans les émeraudes, sous forme d'inclusions fluides.

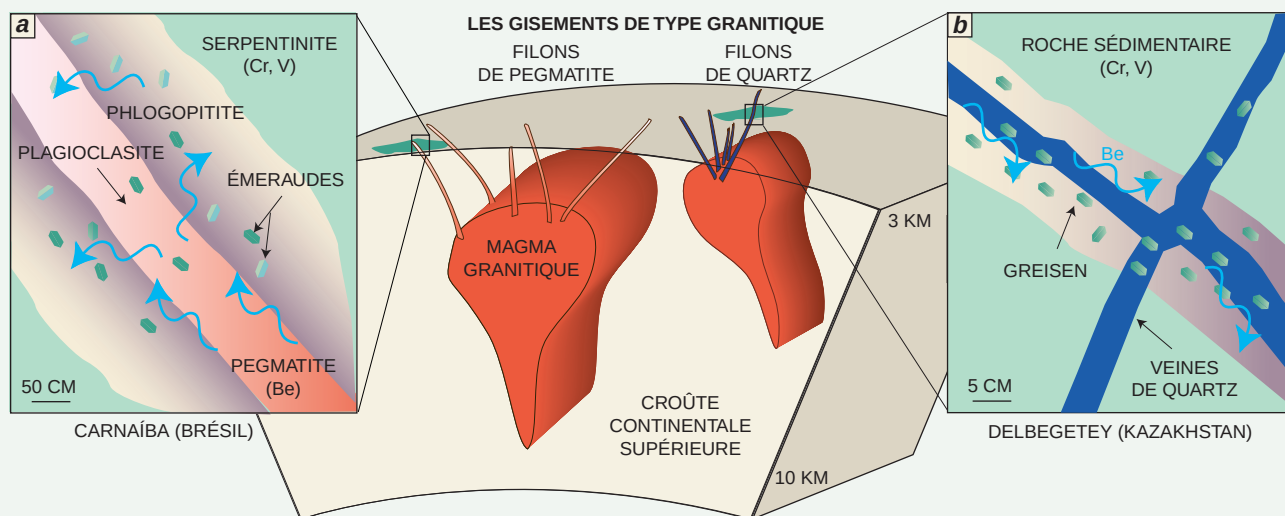
Les gisements de type granitique sont les plus courants. On en trouve notamment au Brésil, en Zambie, au Zimbabwe, en Australie et en Russie. Le gisement de Delbegetey, au Kazakhstan (voir l'encart b), est une variante du type précédent, car l'émeraude est contenue dans des filons de quartz et des greisens (des

roches constituées de quartz et de muscovite, un mica blanc) issus du magma granitique, qui a fissuré une roche sédimentaire. Le béryllium est apporté par les fluides hydrothermaux issus du granite, et le chrome probablement par les roches sédimentaires.

Les gisements associés à des accidents tectoniques profonds, tel le gisement de Santa Terezinha de Goiás, au Brésil (voir l'encart c), sont situés sur des zones de failles profondes et de cisaillements dans la croûte continentale. Ces accidents tectoniques permettent la remontée, dans les parties plus superficielles de la croûte, de fluides métamorphiques (qui circulent dans les parties inférieures de la croûte). Ces fluides, entre 400 et 600°C, sont constitués de gaz carbonique, d'eau et d'éléments légers, notamment de béryllium. Au cours de leur remontée vers la surface, ils circulent à travers des roches basiques, notamment des schistes à talc, qu'ils transforment, là aussi, en phlo-

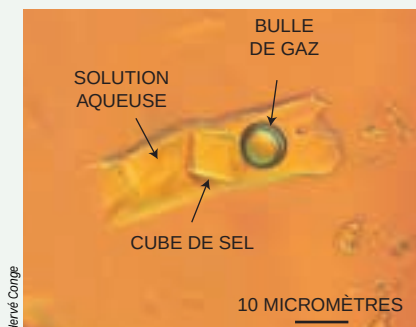


Émeraudes trapèzes de la mine de Coscuez, en Colombie, cristallisées dans une matrice de schiste noir (d'environ quatre centimètres de diamètre).



Dans les différents types de gisements, les roches «mères» contenant du chrome (en vert) sont transformées en roches «filles» (en violet) par le fluide hydrothermal qui y circule (flèches bleues). Celui-ci s'est enrichi en béryllium (Be), qu'il a solubilisé en traversant la pegmatite (a) ou des roches plus profondes (non représentées), en chrome (Cr) provenant de la dissolution de la chromite contenue

ci s'est enrichi en béryllium (Be), qu'il a solubilisé en traversant la pegmatite (a) ou des roches plus profondes (non représentées), en chrome (Cr) provenant de la dissolution de la chromite contenue



Les inclusions triphasées (cube de sel, solution aqueuse, gaz) sont caractéristiques des émeraude colombiennes.

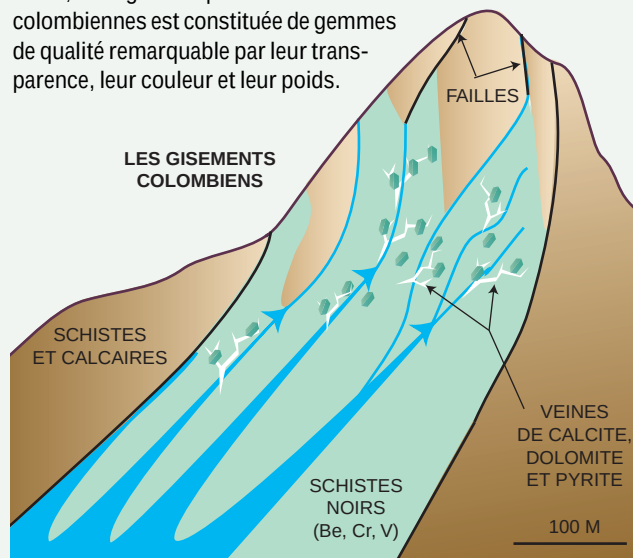
quartz associées soit à de la phlogopite, soit à des assemblages de dolomite et de quartz (voir l'encart d).

Les gisements issus du métamorphisme régional, tel celui d'Habachtal, en Autriche, résultent de la transformation chimique des roches à l'état solide (à cause d'une élévation de température et de pression liée à leur enfouissement dans la croûte terrestre) et des déformations tectoniques qu'elles subissent. Les émeraude cristallisent dans des phlogopitites qui se sont formées au contact de roches basiques (les serpentinites) et de roches volcaniques acides (les schistes à muscovite et grenat). Ces dernières sont enrichies respectivement en chrome (et en vanadium) et en béryllium, nécessaires à la formation des émeraude. Ces éléments ont été solubilisés par des fluides entre 500 et 550°C, composés d'eau et de gaz carbonique. Les gisements de Sikait et de Zabara, en Égypte, de Poona, en Australie, et de Gravelotte, en Afrique du Sud, appartiennent à ce type particulier de gisement.

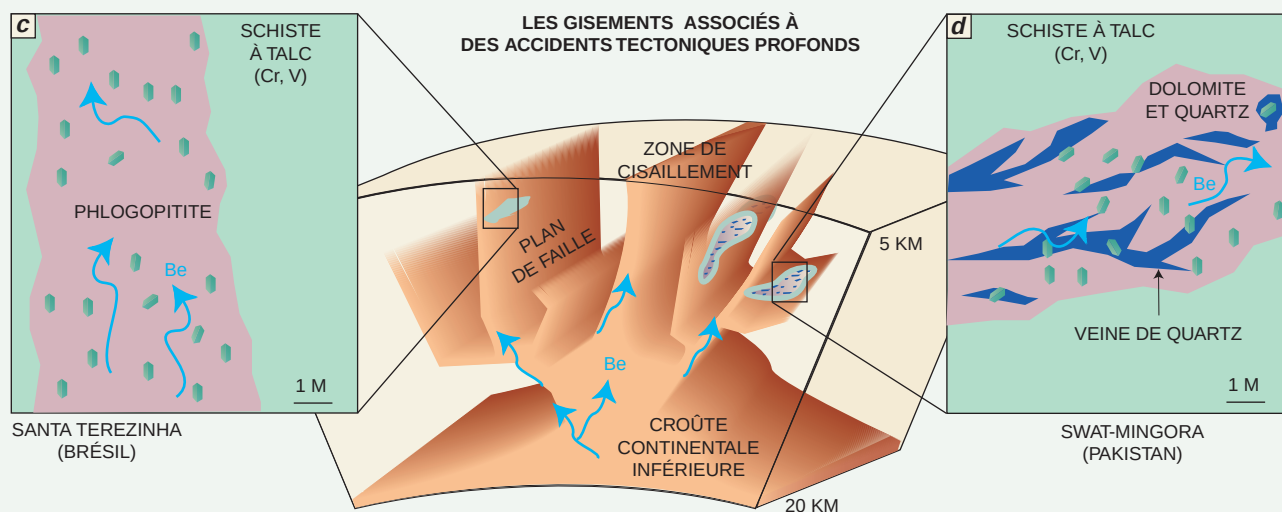
Dans les gisements colombiens, les roches porteuses du béryllium et du chrome sont des roches sédimentaires. Ces éléments, issus du démantèlement de roches de surface, dont certaines contenaient du chrome et d'autres du béryllium, se sont déposés dans les sédiments du bassin de la cordillère orientale, les schistes noirs à grain très fin, principalement constitués d'argile et riches en matières carbonées. Les épisodes de déformation du bassin ont

entraîné l'apparition de failles dans les schistes noirs, où les eaux superficielles se sont infiltrées et se sont mélangées aux eaux présentes dans le fond du bassin. Ces fluides à 300 °C, saturés en sel, ont dissous le chrome, le vanadium et le béryllium des schistes noirs. Grâce à la réunion de ces éléments, des émeraude ont cristallisé dans des petites cavités nommées géodes, à l'intérieur de veines de calcite, de pyrite et de dolomite emplissant les failles. Les cristaux sont bien formés. Ils n'ont pas englobé la matrice de la roche mère, de sorte que les inclusions solides sont quasiment absentes : les émeraude colombiennes sont limpides. Cependant, elles contiennent des «jardins», formés par des inclusions fluides, où coexistent un cube de sel, une phase vapeur, composée d'azote et de gaz carbonique, et une solution aqueuse. Ainsi, une grande partie des émeraude colombiennes est constituée de gemmes

de qualité remarquable par leur transparence, leur couleur et leur poids.



Coupe géologique du gisement colombien de Coscuez, qui s'est formé il y a 38 millions d'années. À cette époque, cinq kilomètres de sédiments le recouvraient. Des fluides salés, qui circulaient dans les failles du bassin sédimentaire ont solubilisé le béryllium (Be), le chrome (Cr) et le vanadium (V) des schistes noirs. Ces éléments ont permis la cristallisation des émeraude dans les veines de calcite, de dolomite et de pyrite, qui se sont formées aux extrémités des failles.



dans des roches basiques (serpentinite, schistes à talc) et en vanadium (V). L'émeraude cristallise dans les roches «filles» où ces deux éléments sont réunis : généralement des phlogopitites (c),

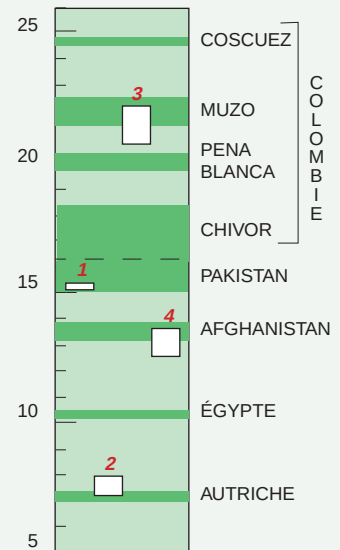
mais aussi parfois des veines de quartz ou des assemblages de quartz et de dolomite (d) et de quartz et de micas blancs, les greisens (b).

La carte d'identité des émeraudes

Pour identifier le gisement d'où provient une émeraude, on détermine sa composition isotopique en oxygène, un élément qui constitue 65 pour cent des atomes du réseau cristallin. Les émeraudes contiennent trois isotopes stables de l'oxygène, de masse atomique 16, 17 et 18. Le noyau de l'oxygène 16 comprend huit protons et huit neutrons, tandis que les noyaux de l'oxygène 17 et 18 comportent respectivement un et deux neutrons de plus. Ces isotopes ont des concentrations distinctes : à cause de leur différence de masse, ils ne sont pas incorporés dans les mêmes proportions lors de la cristallisation à partir du fluide hydrothermal. La composition isotopique des émeraudes d'un gisement donné dépend des conditions dans lesquelles il s'est formé, notamment de la température de cristallisation et de la composition isotopique des roches «mères» partiellement dissoutes par le fluide hydrothermal (voir l'encadré des pages 62 et 63). Par exemple, les valeurs élevées du rapport des concentrations de l'oxygène 18 et de l'oxygène 16 (noté $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) dans les schistes noirs de Colombie sont en partie responsables de la valeur élevée de ce rapport dans les émeraudes du gisement.

Nous avons mesuré le rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ dans des émeraudes issues de 62 gisements distincts, en utilisant la technique classique d'«extraction de l'oxygène» des silicates. Les échantillons, de quelques milligrammes, sont mis en contact avec un oxydant puissant à 650 °C, qui les attaque chimiquement et en extrait l'oxygène, sous forme de gaz. Celui-ci est ensuite transformé en dioxyde de carbone et analysé dans un spectromètre de masse. Cette étude a montré que chaque gisement d'émeraude était caractérisé par un intervalle spécifique de valeurs du rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$. Ce rapport constitue la «carte d'identité» géographique d'une émeraude.

Depuis la fin de l'année 1998, nous avons mis au point l'analyse par sonde ionique de la composition isotopique de l'oxygène dans les minéraux de manière non destructive et avec une grande précision. Cet instrument bombarde la surface des émeraudes d'ions césium sur une aire de quelques micromètres carrés. Le faisceau d'ions accélérés arrache de très faibles quantités d'oxygène (quelques couches atomiques). La composition isotopique de l'oxygène est analysée par le spectromètre de masse de la sonde ionique. Les cratères d'impact, d'environ 20 micromètres de diamètre et 0,05 micromètre de profondeur, sont invisibles à l'œil nu, même avec une loupe. Cette technique étant quasiment non destructive, elle a été employée sur des émeraudes historiques (appartenant à des musées ou des collections privées), pour déterminer leur provenance.



L'analyse de quatre émeraudes historiques par la sonde ionique indique leur provenance : celle de la boucle d'oreille gallo-romaine de Miribel (1), celle de la Sainte Couronne (2), celle du galion espagnol coulé en 1622 (3) et celle du trésor indien du Nizam d'Hyderabad (4). Leurs rapports isotopiques sont portés en ordonnée, ainsi que ceux des gisements connus avant le XVIII^e siècle.

1537, quand il fonde Bogota, l'actuelle capitale. En 1521, lors du sac de Tenochtitlan, l'ancienne capitale aztèque dont les ruines sont aujourd'hui enfouies sous la ville de Mexico, Hernan Cortés arrache à l'empereur Moctezuma un bloc de calcaire où sont enchâssées dix émeraudes d'un vert profond de 2,5 à 5 centimètres de hauteur : cette pièce, conservée au musée de Vienne, en Autriche, est l'une des plus célèbres de la minéralogie.

Les conquistadores ne découvrent les premiers gisements d'émeraudes que 20 ans après leur arrivée : celui de Chivor en 1537, celui de Muzo dans les années 1550 et celui de Coscuez en 1646. Leur exploitation est intensive. La royauté espagnole perçoit une dîme d'un cinquième des pierres rapportées du Nouveau Monde. Le galion *Nuestra Señora de Atocha*, qui coule en 1622 près des côtes de Floride, livre 2 300 émeraudes lorsqu'il est repêché. L'analyse de l'une d'entre elles par la sonde ionique indique non seulement son gisement d'origine (Muzo), mais la méthode est suffisamment précise pour que la mine elle-même soit identifiée : c'est celle

de Tequendama, exploitée par les Espagnols à partir de 1594. L'afflux d'émeraudes rapportées du Nouveau Monde a de multiples conséquences économiques, mais aussi esthétiques : elles ornent tous les bijoux espagnols. Les croix en sont entièrement pavées. À la fin du XVII^e siècle, la production décline, à cause des éboulements dans les mines et des révoltes des mineurs, traités en esclaves. En Europe, les émeraudes restent caractéristiques de la bijouterie espagnole et portugaise. Les pays voisins admirent ces beaux cristaux, qui ne sont plus givreux, comme ceux de l'Antiquité et du Moyen Âge. Les souverains en raffolent. Charles I^{er} d'Espagne aurait financé son élection à la tête du Saint Empire avec des émeraudes colombiennes. Catherine de Médicis offre à son fils cadet un pendentif orné d'une grande table d'émeraude (conservée au cabinet des Médailles, à Paris). Parmi les autres pièces exceptionnelles de cette époque, un pot à onguents, sculpté par un artisan milanais dans un cristal d'émeraude, mesure dix centimètres de haut (voir la figure 4).

Une émeraude afghane en Inde

L'Inde regorge de gemmes. Les maharajas en sont friands et s'en parent à foison. D'où viennent les nombreuses émeraudes de leurs trésors ? Le pays possède les seules mines de diamants connues avant la découverte de celles du Brésil, en 1725, mais pas de mines d'émeraudes. Elles sont importées d'Égypte, et peut-être de Bactriane et du Bengale. La découverte récente de mines au Rajasthan et en Inde du Sud (à Coimbatore) relance le débat. Toutefois, aucune trace d'exploitation antique n'a été retrouvée. À partir du XVI^e siècle, les émeraudes viennent de Colombie. Après avoir voyagé sur les galions espagnols jusqu'en Europe, elles repartent sous pavillon portugais vers les comptoirs indiens de Goa et de Diu. Depuis que le navigateur portugais Vasco de Gama a découvert la route maritime des Indes par le cap de Bonne-Espérance, en 1498, les Portugais ont le monopole du transport de marchandises sur ce trajet. Moins fréquemment, les émeraudes empruntent aussi d'autres itinéraires, par la

Turquie ou par l'océan Pacifique (voir la figure 3).

Au XVII^e siècle, le voyageur français Jean-Baptiste Tavernier remarque qu'en Inde, les émeraudes sont si abondantes qu'elles se négocient à 20 pour cent au-dessous du prix français. Les Espagnols et les Portugais s'enrichissent en vendant leurs émeraudes sur le marché indien ou en échangeant ces pierres contre de l'or et des diamants. Les Moghols polissent les prismes d'émeraudes en perles irrégulières, afin de perdre le moins de matière possible. Ils les portent en pendeloque, en dégradé sur des colliers, ou seules, comme ornement de turban. Les gemmes de moins bonne qualité sont taillées en perles côtelées. Les grands cristaux d'émeraudes, plus rares, sont sectionnés latéralement, en « tables » à six côtés, ou taillés en rectangles aux angles émoussés, gravés de rinceaux feuillagés et fleuris ou d'écritures coraniques (voir la figure 5). Au XIX^e et au XX^e siècle, les parures des maharajas comportent d'innombrables émeraudes, diamants, perles et rubis, qui contribuent à leur prestige.

À partir des années 1920, avec l'art décoratif, ces émeraudes, des perles lisses ou gravées, en forme de feuille, ont une seconde vie : les joailliers de la place Vendôme, tels Cartier et Chaumet, les montent sur des bijoux identiques plus légers (en platine) ou les sertissent à la mode occidentale. Jusqu'à dans les années 1960, Van Cleef propose toujours ces parures fastueuses d'inspiration indienne.

Quatre émeraudes taillées au XVIII^e siècle, de grandes dimensions et de très bonne qualité (translucides et d'un vert profond) du trésor de Nizam d'Hyderabad, le maharaja du plus puissant des États d'Inde du Sud, ont été analysées avec la sonde ionique. Ces belles émeraudes translucides, d'un vert profond, laissaient présager, par leurs inclusions triphasées caractéristiques (voir l'encadré des pages 62 et 63), une origine colombienne, que la sonde a confirmé pour trois d'entre elles : elles viennent du gisement de Muzo. Les rapports isotopiques obtenus indiquent même les mines dont elles sont issues : Peña Blanca, Coscuez et Tequendama.

La quatrième émeraude du trésor indien de Nizam d'Hyderabad vient d'Afghanistan, une provenance inattendue. Or, ce gisement, n'est connu



Muséum d'histoire naturelle de Vienne, Autriche.

4. CE POT À ONGUENTS, réalisé par un artisan milanais de la Renaissance, est taillé dans un cristal d'émeraude colombien haut de dix centimètres.



Ph. Siebert

5. À L'ÉPOQUE MOGHOLE (du XVI^e au XVIII^e siècle), les émeraudes sont taillées en perles côtelées, comme sur ce collier. Les grands cristaux d'émeraudes sont sectionnés latéralement, en « tables » à six côtés et gravés de rinceaux feuillagés et fleuris ou d'écritures coraniques.

que depuis une vingtaine d'années, et on avait perdu toute trace d'exploitation antérieure. Les émeraudes afghanes peuvent être aussi belles que les émeraudes colombiennes, avec le même type d'inclusions. La provenance afghane de cette émeraude prouve que les pierres de ce gisement étaient déjà commercialisées au XVIII^e siècle (ce qui n'exclut pas une exploitation antérieure) et donne une nouvelle résonance à la thèse d'un gisement en Afghanistan connu dès l'Antiquité.

Nombre d'émeraudes indiennes se trouvent aujourd'hui en Iran, où

les descendants des Perses détiennent le plus gros trésor de gemmes du monde. Le shah Nader l'a constitué à partir des trésors moghols, pillés lors du sac de Delhi, en 1739. Le trésor est conservé à la banque Mélli de Téhéran, où les émeraudes sont stockées par vasques pleines. Lors du règne du dernier shah, deux gemmologues américains ont eu l'autorisation de les examiner et y ont observé les fameuses inclusions triphasées caractéristiques des pierres colombiennes et afghanes. Combien d'émeraudes afghanes se cachent-elles dans ce trésor ? Des analyses avec la sonde ionique permettraient de répondre à cette question et d'avoir ainsi une indication sur l'importance de l'exploitation du gisement afghan dans le passé.

Ces recherches à l'aide des résultats des fouilles archéologiques, des textes anciens et des références d'orfèvrerie ont permis de gommer nombre d'erreurs souvent répétées et d'établir la chronologie la plus précise de la route des émeraudes.

Gaston GIULIANI (Institut de recherche pour le développement) et Marc CHAUSSIDON (CNRS) sont géologues au Centre de recherches pétrographiques et géochimiques de Vandœuvre, près de Nancy. Michèle HEUZÉ est gemmologue diplômée d'État et historienne du bijou, une discipline qu'elle enseigne au Centre de formation des arts appliqués à Paris (ASAP).

John SINKANKAS, *Emeralds and other beryls*, Geoscience Press, 1989

D. GIARD, G. GIULIANI, A. CHEILLETZ, E. FRITSCH et E. GONTHIER, *L'émeraude. Connaissances actuelles et perspectives*, AFG, CNRS, ORSTOM, eds, 1998.

G. GIULIANI, M. CHAUSSIDON, C. FRANCE-LANORD, C. ROLLION, D. MANGIN et P. COGET, *Analisis*, vol. 27, n° 3, pp. 203-206 : *Application de l'analyse isotopique par spectrométrie de masse et sonde ionique de l'oxygène des émeraudes naturelles*, 1999.

G. GIULIANI, M. CHAUSSIDON, H.-J. SCHUBNEL, D.H. PIAT, C. ROLLION-BARD, C. FRANCE-LANORD, D. GIARD, D. DE NARVAEZ et B. RONDEAU, *Oxygen Isotopes and Emerald Trade Routes since Antiquity*, in *Science*, n° 287, pp. 631-633, 2000.

Michèle HEUZÉ, *Le jardin secret des émeraudes*, in *L'objet d'Art*, n° 345, pp. 52-65, 2000.

