

La Mine de Piteiras, Minas Gerais, nouvelle source d'émeraude de belle qualité au Brésil

RONDEAU Benjamin^a, NOTARI Franck^a, GIULIANI Gaston^c, MICHELOU Jean-Claude^d, MARTINS Sergio^e, FRITSCH Emmanuel^f, RESPINGER Axel^b

Résumé

La mine de Piteiras produit depuis 2001 de petites quantités d'émeraude de belle qualité. Elle se trouve dans le Quadrilátero Ferrífero de l'Etat de Minas Gerais, au Brésil, entre les gisements connus de Capoeirana et Belmont. La minéralisation est située sur la zone de chevauchement (orogénèse Brasiliano) qui met en contact des roches ultrabasiques avec un granite très déformé. Les émeraudes se trouvent dans un schiste à amphibole verte et mica phlogopite. La moyenne de la valeur des isotopes de l'oxygène des émeraudes est $\delta^{18}\text{O} = 6,8 \pm 0,1\text{‰}$ (presque pas de variation dans le gisement), et donc proche de celle des gisements de la région. Elle reste la valeur la plus basse mesurée pour les émeraudes brésiliennes. Elle est proche des valeurs isotopiques déterminées pour les roches ultramafiques. La signature iso-

topique de l'hydrogène de l'eau structurale est une moyenne de δD de $-36,7 \pm 4\text{‰}$, prouvant une origine métamorphique et non magmatique. Les fluides parents appartiennent au système $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ et leurs conditions de piègeage sont évaluées à une pression d'environ 2,5 kbar pour une température comprise entre 450 et 650°C. Ces fluides sont strictement d'origine métamorphique, même si des granites sont spatialement associés à l'émeraude.

Les caractéristiques gemmologiques des émeraudes de Piteiras sont typiquement celles des émeraudes brésiliennes. Les canaux et cavités contiennent tous de l'eau (ou saumure) et du CO_2 en phases liquide et gazeuse. La quantité assez importante de CO_2 contenu dans ces émeraudes se voit clairement en spectrométrie infrarouge (IRTF). La plupart de ces cavités contiennent une ou plusieurs phases miné-

rales solides, mais pas de halite (NaCl). Les feldspaths sont représentés principalement par l'albite qu'on y rencontre sous diverses morphologies, aussi bien dans la masse de l'émeraude que dans les cavités. Cette variation de morphologie de l'albite (parfois dans le même spécimen) n'est pas fréquente. La quantité relativement importante de fer véhiculée par les fluides a permis la formation de pyrrhotite sous forme de feuillets. Nous avons aussi observé des cristaux d'actinolite de morphologie prismatique et de taille millimétrique.

La mine de Piteiras produit des émeraudes pouvant être d'excellente qualité, mais la production est, pour le moment, sporadique. Le potentiel élevé du gisement permettra, si l'exploitation est développée, la commercialisation de quantités considérables d'émeraudes de belle qualité provenant de cette mine récemment découverte.

Abstract

The Piteiras mine produces since 2001 small quantities of emerald of excellent quality. It is located in the Quadrilátero Ferrífero in the state of Minas Gerais, Brazil, between the well-known Capoeirana and Belmont mine deposits. The mineralization is located on the thrust zone (Brasiliano orogenesis) putting in contact ultramafic rocks with highly deformed granites. Emeralds are hosted in a green amphibole and phlogopite mica schist. The average oxygen isotopic composition of the emeralds is $\delta^{18}\text{O} = 6,8 \pm 0,1\text{‰}$ (nearly constant over the deposit), therefore close to the values for the neighboring deposits, still the "lightest" value measured for Brazilian emeralds. This value is within the isotopic range defined for ultra-

mafic rocks. The average isotopic signature of the hydrogen from the structural water is $\delta\text{D} = -36,7 \pm 4\text{‰}$. This proves that the fluids are of metamorphic origin rather than magmatic. Parent fluids belong to the $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ system and their trapping conditions are evaluated for a pressure around 2,5 kbar and a temperature ranging from 450 to 650°C. These fluids are strictly metamorphic in origin even if granites are spatially associated with the emerald mineralization. The gemmological characteristics of the emeralds from Piteiras are typically those of Brazilian emeralds. All the channels and cavities contains water (or brine) plus liquid and gaseous CO_2 phases. The quite important amount of CO_2 contained in these emeralds can be easily observed in infrared spectrometry (FTIR). Most of those cavities

contains one or several mineral solid phases, but no halite (NaCl). Feldspars are mainly represented by albite. It is encountered with various morphologies in the body of the emerald as well as in the multiphase inclusions. This morphological variation of albite (sometimes in the same sample) is not common.

The relatively important amount of iron conveyed by the fluids makes the formation of foliated pyrrhotite possible. We observed as well prismatic actinolite of millimetric size. The Piteiras mine produces emeralds which can be of excellent quality, but the production is as of yet sporadic. The high potential of this deposit will allow (if the deposit is developed) the commercialization of considerable quantities of high quality emeralds.

^a Département Histoire de la Terre, Muséum National d'Histoire Naturelle, 75005 Paris - Rondeau@mnhn.fr

^b GemTechLab, 2 rue Chantepoulet, CH-1201 Genève, Suisse - gemtechlab@bluewin.ch

^c IRD et CRPG/CNRS, BP 20, 54501 Vandœuvre cedex, France - giuliani@crpg.cnrs-nancy.fr

^d International Colored Gemstones Association Director, Calle 10, N°2-38, Bogota, Colombie - jcmichelou@yahoo.com

^e Stone World, Rua epaminondas Otoni, 665 9° andar 39800-013 Teófilo Otoni Brésil - smartins@attglobal.net

^f Institut des Matériaux Jean Rouxel (IMN), 2 rue de la Houssinière, BP 32229, 44322 Nantes cedex 3 - fritsch@cnrs-imn.fr

1- Introduction

Dès le XVI^{ème} siècle, les "Bandeirantes" Portugais ont recherché l'émeraude au Brésil, notamment dans l'Etat du Minas Gerais mais ils ne découvrirent que de la tourmaline verte. Le premier indice ne fut découvert qu'en 1912, à Brumado, dans l'Etat de Bahia (Just, 1926) mais il ne suscita aucun intérêt. Par contre, la découverte en 1961 de l'indice de Salininha, dans l'Etat de Bahia, stimula la prospection. Après 1963, d'autres gisements furent découverts dans cet Etat (Fig. 1). Aujourd'hui, 5 gisements importants sont exploités au Brésil comme *garimpos* (réserves nationales bénéficiant d'un code minier particulier et exploitées suivant des méthodes artisanales) ou de façon privée. Il s'agit des *garimpos* de Carnaíba et Socotó (Bahia), de Santa Terezinha appelé aussi "Campos Verdes" (Goiás), Capoeirana, et de la mine Belmont (Minas Gerais).

Depuis environ début 2001, un nouveau gisement brésilien livre irrégulièrement sur le marché des émeraudes de très belle qualité, mais toujours en petite quantité. Elles proviennent de la mine de Piteiras, située entre la mine Belmont et le *garimpo* de Capoeirana (Fig. 2).

Le présent travail est focalisé sur l'émeraude de Piteiras. Il traite de l'histoire de sa découverte et des conditions d'exploitation de la mine, de son cadre géologique et de sa genèse ainsi que de ses caractéristiques géochimiques et gem-

mologiques. Quatre des échantillons ayant servi aux études non destructives ont désormais intégré la Collection de Minéralogie du Muséum sous le numéro 203.155.

2- Historique de la découverte des gisements d'émeraude dans l'Etat du Minas Gerais

La première émeraude a été découverte en 1920 dans la région de Santana dos Ferros (indices de Ferros et Cubas), située à 180 km au nord-nord-est de Belo Horizonte (Cunha, 1961). A Ferros (Fig. 3), l'émeraude fut exploitée dans les éluvions et alluvions du "rio" Ribeirão das esmeraldas. L'indice est aujourd'hui abandonné. Par la suite d'autres indices ont été trouvés accidentellement notamment celui de Brejaúba dans la région de Santa Maria de Itabira et d'autres à São Domingos do Prata.

Les découvertes les plus récentes et économiquement viables se situent entre les localités d'Itabira et de Nova Era. En 1978, le futur gisement d'Itabira est découvert dans une propriété privée dénommée "Fazenda Itabira". Après trois années d'exploitation artisanale réalisée par le propriétaire des terrains, la mine est reprise et mécanisée par la société minière Belmont Gemas Ltda. La mine Belmont (ex-Itabira) devient la première exploitation d'émeraude privée du Brésil (Bastos, 1981 ; Hänni et al., 1987 ; Schwarz, 1987 ; Epstein, 1989 ; de Souza, 1990). En 1988, des émeraudes sont découvertes à Capoeirana, sur la commune de Nova Era, à une dizaine de kilomètres au sud-est de Belmont. Cette fois, l'invasion de *garimpeiros* conduit à la création d'une coopérative de chercheurs indépendants appelée *Coogemig* qui détient toujours les droits miniers de ce secteur. Ceux-ci sont cédés aux

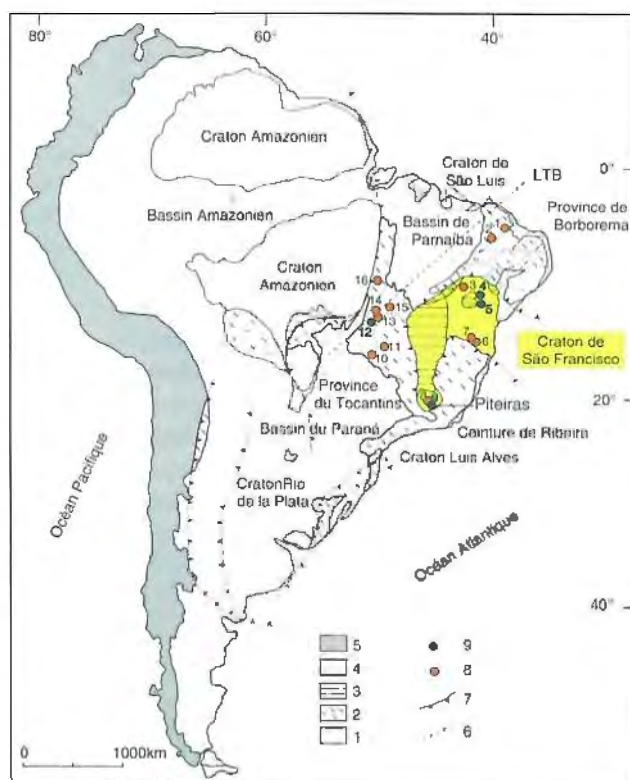


Fig. 1 - Le Précambrien dans le continent Sud-Américain (localisation des différents indices et mines d'émeraude, modifié d'après Brito Neves et Cordani, 1991). 1 Aires cratoniques archéennes ; 2 Ceintures mobiles proterozoïques ; 3 Couverture sédimentaire du Protérozoïque supérieur ; 4 Bassins sédimentaires post-proterozoïques ; 5 Chaîne andine ; 6 Linéament Trans-Brasiliano (LTB) ; 7 Zones de collision ; 8 Indices d'émeraude : (1 : Coqui, 2 : Tauá, 3 : Salininha, 6 : Anagé, 7 : Brumado, 8 : Santana dos Ferros, 10 : Itabira, 11 : Pirenópolis, 13 : Mara Rosa, 14 : Porangatu, 15 : Pala Erma, 16 : Monte Santo) ; 9 Gisements d'émeraude : (4 : Socotó, 5 : Carnaíba, 9 : Belmont, Piteiras, Capoeirana, 12 : Santa Terezinha).

The Precambrian in the South American continent (location of the different occurrences and emerald deposits, modified after Brito Neves et Cordani, 1991). 1 Archean cratonic areas ; 2 Interior mobile belts ; 3 Upper Proterozoic sedimentary cover ; 4 Post Proterozoic sedimentary basins ; 5 Andean chain ; 6 Trans-Brasiliano Lineament (LTB) ; 7 Traces of collisional sutures ; 8 Emerald occurrences : (1 : Coqui, 2 : Tauá, 3 : Salininha, 6 : Anagé, 7 : Brumado, 8 : Santana dos Ferros, 10 : Itabira, 11 : Pirenópolis, 13 : Mara Rosa, 14 : Porangatu, 15 : Pala Erma, 16 : Monte Santo) ; 9 Emerald deposits : (4 : Socotó, 5 : Carnaíba, 9 : Belmont, Piteiras, Capoeirana, 12 : Santa Terezinha).

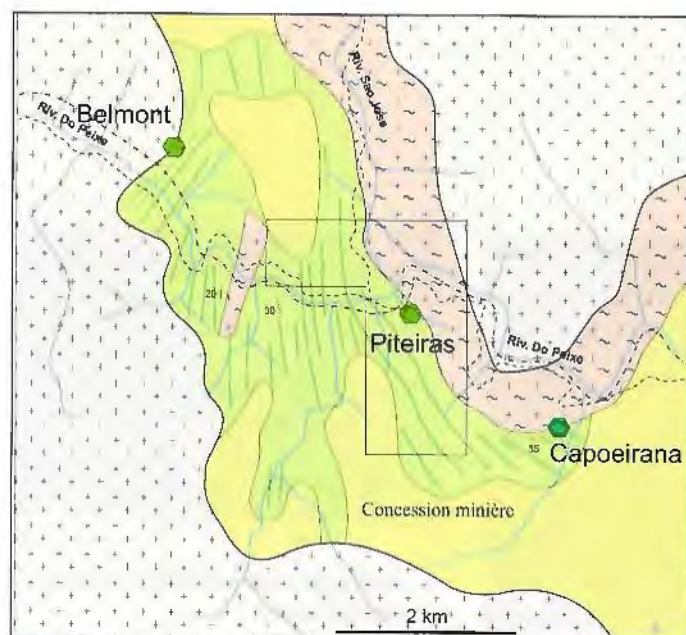


Fig. 2 - Carte géologique de la région de Piteiras. Trois gisements sont maintenant exploités, tous dans le même contexte géologique, au contact "tectonique" entre des niveaux ultrabasiques (roches riches en chrome, vanadium et magnésium, principalement) et des granites déformés (avec des pegmatites contenant du béryllium, aluminium et silicium), modifié d'après Souza et al., (1992).

Geological map of the Piteiras area. Three deposits are currently mined. All occurs in the same geological context. Ultrabasic bodies (chromium, vanadium and magnesium-rich-bearing rocks) are in contact with deformed granites (beryllium, aluminum-silicium-rich pegmatites), modified after Souza et al., (1992).

chercheurs indépendants à condition que l'exploitation soit organisée et sécurisée.

Le gisement d'émeraude de Piteiras a été découvert officiellement en 1998. Piteiras était l'une des fermes d'élevage "Fazenda Piteiras" les plus prospères de la région avec 80% des terrains appartenant à la municipalité d'Itabira et 20% à celle de Nova Era. Située à 15 km au sud-est de la ville d'Itabira, la concession minière s'étend sur 313 hectares entre la mine Belmont et le garimpo de Capoeirana (Fig. 2).

3- Exploitation et production de la mine de Piteiras

En 1999, la mine appartenait à la société brésilienne Piteiras Mineração

Ltda qui détenait la totalité des droits d'exploitation minière de la Fazenda Piteiras. Par ailleurs, la compagnie minière SEAHAWK MINERALS, d'origine canadienne (et cotée à la bourse de Vancouver), notamment spécialisée dans l'exploitation des mines d'or, s'intéressa au potentiel en émeraude de la région. Elle décida de prospecter et d'explorer systématiquement le secteur. En 1999, cette compagnie racheta 75% des parts de Piteiras Mineração Ltda et, en 2000, les premiers bruts d'émeraude de qualité commerciale étaient produits. Les opérations minières furent momentanément interrompues à partir d'octobre 2001, surtout par le manque de connaissances du développement minier appliqué aux gemmes.

SEAHAWK MINERALS s'associa

ensuite à la société brésilienne Stone World, spécialisée dans la transformation du brut d'émeraude, achat, vente et exportation. Désormais, cette dernière se charge de la distribution des émeraudes, qu'on a déjà pu voir par ailleurs aux salons de Tucson, Bâle, Las Vegas et Hong Kong.

On compte localement 15 secteurs miniers en activité pérenne, répartis sur les trois sites principaux : Belmont, Piteiras et Capoeirana. Les productions sont petites et sporadiques. Ces petites concessions minières peuvent par exemple produire 10 à 20 kilos d'émeraude de très bonne qualité en quelques jours, puis ne plus rien produire pendant des semaines, voire des mois. Cependant en 1981, les réserves mesurées pour la mine Belmont atteignaient

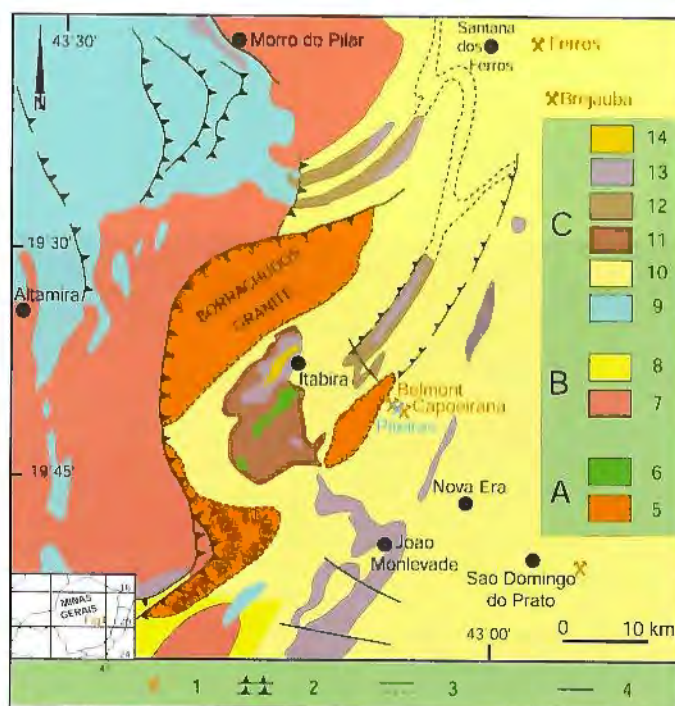


Fig. 3 - Esquisse géologique de la bordure sud ouest du craton de São Francisco et localisation des gisements et indices à émeraude du Quadrilátero Ferrífero, modifié d'après Schorsch et al., (1982). 1 : gisement et indice à émeraude ; 2 : faille de chevauchement ; 3 : contact géologique ; 4 : faille ; A : roches ultrabasiques métamorphisées et roches cataclastiques avec 5 : roches granitiques type Borrachudos, 6 : roches meta-ultrabasiques ; B : Groupe du Pré-Minas avec 7 : socle archéen, 8 : Super groupe Rio das Velhas ; C : Super groupe Minas avec 9 : quartzite Espinhaço, 10 : Séquence des paragneiss, 11 : Séquence des schistes verts, 12 : Groupe Carajá, 13 : Groupe Itabira, 14 : Groupe Pracicaba.

Geological sketch of the southwestern border of the São Francisco craton with the location of the deposits and occurrences of emerald in the Quadrilátero Ferrífero, modified from Schorsch et al., (1982). 1: deposit and occurrence of emerald; 2: thrust fault; 3: geological contact; 4: fault; A: meta-ultrabasic and cataclastic rocks with 5: granitic rocks type Borrachudos, 6: meta-ultrabasics; B: Pre-Minas Group with 7: Archean basement, 8: Rio das Velhas Super Group; C: Minas Super Group with 9: Espinhaço quartzite, 10: paragneiss sequence, 11: green schist sequence, 12: Carajá Group, 13: Itabira Group, 14: Pracicaba Group.



Fig. 4 - Vue de l'entrée de l'unique galerie de Piteiras. Il est prévu de l'étendre à une profondeur de 200 m.
Entrance of the sole tunnel of the Piteiras mine. It is planned to reach a depth of 200 m.

1 162 000 m³ de minerai avec une teneur moyenne de 165 grammes d'émeraude par tonne (Schwarz, 1987). Cette estimation mesurée qui correspond à une teneur de 825 carats par tonne était sur-évaluée et probablement biaisée par le fait que la partie superficielle du gisement comportait des émeraudes provenant des colluvions, des éluvions et de la roche en place.

A Piteiras, l'exploitation minière comporte une seule galerie (Fig. 4). Un plan incliné, actuellement d'une profondeur de 50 m, est projeté pour atteindre une profondeur de 200 m. Les réserves, établies d'après les relevés géologiques et les sondages, sont estimées à près de 800.000 tonnes de minerai contenant 112 carats d'émeraude par tonne (l'équivalent de 22,4 grammes par tonne), soit un total de 88 millions de carats d'émeraude brute. D'après l'expérience acquise sur des gisements de même type, on peut penser que la mine de Piteiras constituera dans le futur une importante source d'émeraude de qualité. La figure 5 montre un lot typique d'émeraude de Piteiras. Le plus gros cristal trouvé dans

la mine pèse 3 200 grammes soit 16 000 carats (Fig. 6) et a de petites parties gemmes.

La production est encore limitée, et seulement 50 personnes au total (mineurs, techniciens et ingénieurs) travaillent sur le site (Fig. 7). Cependant, les travaux d'infrastructure qui sont actuellement en cours permettront de compter sur une production non seulement plus importante mais aussi plus régulière. Actuellement, 90% des



Fig. 5 - Lot d'émeraudes brutes. Ce lot peut être extrait soit en quelques jours soit après des semaines et des mois d'exploitation infructueuse.
Parcel of rough emeralds. These emeralds can be found either in a few days or after long weeks or months of unsuccessful mining.

gemmes extraites de Piteiras sont de bonne, voire d'excellente qualité : la couleur et le "cristal" (qualité jugeant de l'éclat et de la transparence d'une pierre) sont supérieurs aux autres émeraudes brésiliennes, ce qui explique que les prix obtenus sur le marché inter-professionnel peuvent aller de 20 US\$ jusqu'à 8 000 US\$ par carat.

4- Cadre géologique des émeraudes du Minas Gerais

Les différents gisements et indices d'émeraude du Brésil se localisent dans le craton de São Francisco et dans les provinces tectoniques du Tocantins et de Borborema qui forment les bordures ouest et nord-est du craton (Fig. 1).



Fig. 6 - Cristal d'émeraude brute de 3 200 grammes (16 000 carats). C'est la plus grosse émeraude trouvée à ce jour à Piteiras.

Rough emerald crystal weighing 3,200 grams (16,000 carats). This is the biggest emerald found in Piteiras to date.

Les émeraudes du Minas Gerais se situent dans l'extrême partie sud-ouest du craton de São Francisco, connu également sous le nom du Quadrilatère Ferrifère (Fig. 1, 3). Dans cette région, le craton comporte trois ensembles lithostructuraux bien définis (Almeida *et al.*, 1981 ; Inda *et al.*, 1984 ; Ledru et Bouchot, 1993).

- un premier, formé d'unités archéennes (blocs gneissiques et migmatitiques de *Gavião* d'âge compris entre 3,2 et 2,7 milliards d'années).



Fig. 7 - La zone d'exploitation de Piteiras.
View of the Piteiras mining area.

- un deuxième, formé d'unités supracrustales archéennes (ceintures de roches vertes de *Rio das Velhas*) et de formations détritiques.

- des unités supracrustales du Protérozoïque inférieur (âge compris entre 2,7 et 1,6 milliards d'années), composées principalement par la formation volcano-sédimentaire à forte composante détritique de *Minas*.

Le Quadrilatère Ferrifère a été soumis à d'intenses déformations tangentielles lors de l'orogénèse transamazonienne (2,2 à 1,8 milliards d'années, Machado *et al.*, 1989 ; Marshak et Alkmin, 1989 ; Brito Neves et Cordani, 1991 ; Romano *et al.*, 1991) mais également au cours de la phase orogénique du *Brasiliano* (0,9 à 0,4 milliards d'années ; Brito Neves et Cordani, 1991). La distinction entre les deux phases tectoniques est généralement difficile à établir dans le Quadrilatère Ferrifère (Bertrand et Jardim de Sá, 1990). Les gisements d'émeraude se situent uniquement dans les unités supracrustales du Protérozoïque inférieur de *Minas* (Santana dos Ferros, Mina Belmont-Piteiras-Capoeirana). Ils sont associés spatialement à des granites et/ou des pegmatites dont l'âge n'est pas toujours connu. Le gisement de Capoeirana a été daté par la méthode argon/argon sur des micas magnésiens (phlogopites) intimement associés à l'émeraude (Ribeiro-Althoff *et al.*, 1997). L'âge obtenu est de $508 \pm 0,2$ Ma et indique une relation étroite entre

la formation de l'émeraude et la phase orogénique *Brasiliano* (Giuliani *et al.*, 1997a).

4.1 L'occurrence de Santana dos Ferros

Cette occurrence, appelée Ferros mais également connue sous le nom de Fazenda Bom Sossego, se situe à 160 km au Nord-Est de Belo-Horizonte (Fig. 3). Cunha (1961) donne une brève description du cadre géologique de l'indice. Il signale la présence d'un socle gneissique déformé et recoupé par des veines de pegmatites exploitées pour l'aigue-marine. L'émeraude est reliée à des filons de pegmatites ; elle se localise dans des schistes à biotite (de direction N75-90°E, pendage nord). Cunha (*op. cit.*) ne signale pas la présence de roches basiques associées au socle. Le filon principal possède une épaisseur de 3,5 m et les feldspaths sont fortement kaolinisés. Le quartz de la pegmatite a été partiellement dissous par des fluides hydrothermaux et la pegmatite s'est enrichie en feldspath. L'émeraude est associée au quartz et à la biotite magnésienne.

4.2 Les gisements de Belmont, Capoeirana et Piteiras

Ces trois gisements se situent à 15 km à l'Est d'Itabira (Fig. 3). Le gisement de Belmont est situé à 5 km à l'ouest du *garimpo* de Capoeirana (Fig. 2).

Ces gisements se situent dans deux zones de chevauchement à vergence ouest, qui mettent en contact une série volcano-sédimentaire et un granite appelé "Borrachudos" qui comprend deux faciès (Schorscher et Guimarães, 1976 ; Souza *et al.*, 1992) : un faciès folié, voire mylonitique, riche en filons de pegmatite, en bordure de la série volcano-sédimentaire ; un faciès lenticulaire composé de gros cristaux de feldspaths dans la partie interne du massif.

Les formations supracrustales appartiennent à la séquence du Supergroupe *Minas* définie par Schorscher et Guimarães (*op. cit.*), datée par la méthode U/Pb à 2125 Ma (Machado *et al.*, 1989). Dans la région d'Itabira, la série volcano-sédimentaire se caractérise par une intercalation de métapélites (schistes à biotite et muscovite parfois grenat et staurotite), de roches ultrabasiques (schistes à talc, chlorite et trémolite), de quartzites et de tufs. Le granite "Borrachudos" correspond à une partie du socle archéen (gneiss et migmatites du bloc de *Gavião*), qui a subi une intense mylonitisation et une altération potassique (feldspath potassique) au Protérozoïque (Schorscher *et al.*, 1982). Ce granite contient des porphyroblastes de microcline et montre une foliation soulignée par la biotite et l'amphibole.

Sur la bordure de la zone de chevauchement orientale (mines de Capoeirana et de Piteiras), le granite est dépourvu de porphyroblastes et il est mylonitisé. Des filons de pegmatites à beryl (de style aigue-marine) et de pegmatites feldspathisées ("pegmatoïdes" décrits par Souza *et al.*, *op. cit.*) se concentrent dans la zone de contact entre les gneiss et les formations supracrustales. L'ensemble est recoupé par des filons et veinules de quartz. Les circulations fluides responsables de la formation de l'émeraude ont été guidées par les structures chevauchantes à vergence ouest qui marquent le contact entre les deux unités géologiques principales.

A la mine Belmont, les schistes à talc, chlorite et chromite, de direction N-NE, ont une largeur de 750 à 1200 m. Ils sont recoupés par de nombreux filons de pegmatite. Le filon principal a une épaisseur de 10 mètres. Il est partiellement feldspathisé et l'émeraude se concentre dans les schistes à biotite magnésienne adjacents (Hänni *et al.*, 1987 ; Schwarz, 1987).

A Capoeirana, les veines de pegma-

tites sont moins épaisses (1 décimètre), dépourvues de quartz et totalement feldspathisées. Les filonnets de quartz sont prédominants et ils recoupent les gneiss et les formations supracrustales. Ils sont liés à un épisode de cisaillement qui a guidé l'infiltration hydrothermale. La métasomatose fissurale a provoqué le développement de biotite (biotitisation en masse, cristaux > 1 cm) des roches environnantes. Les talcschistes sont transformés en schistes à biotite magnésienne (*les phlogopitites*) où se concentre l'émeraude (Giuliani *et al.*, 1997a). Dans les deux gisements, les roches à émeraude sont fortement microplissées et les pegmatites feldspathisées sont boudinées.

A Piteiras (Fig. 2), la minéralisation est située comme à Capoeirana sur la zone de chevauchement qui met en contact la série des supracrustales qui contient des roches ultramafiques riches en chrome et le granite "Borrachudos" (Kanis *et al.*, 2001). Le gisement a été découvert et les réserves ont été définies en combinant systématiquement une prospection géologique (cartographie des roches à phlogopite e.g. les *phlogopitites* porteuses de l'émeraude) et géochimique (cartographie des anomalies en béryllium, chrome, vanadium des roches et des sols, entre autres) sur la zone comprise entre Belmont et Capoeirana. L'émeraude a alors été identifiée à la ferme Piteiras, et cartographiée en détail par 45 forages de 200 m de profondeur : 35 forages interceptent le niveau à émeraude appelé le "blackwall" et 18 autres contiennent des fragments d'émeraude. Le "blackwall" est une roche noire et foliée dont les minéraux les plus abondants sont l'amphibole verte (dominante) et le mica phlogopite. Cette domination "blackwall" est l'équivalent des schistes à biotite ou de la "phlogopitite", termes utilisés par divers auteurs (voir Schwarz *et al.*, 2002).

Etat du Brésil	Mine	Numéro échantillon	$\delta^{18}\text{O}$ émeraude (‰, SMOW)	$\delta^{18}\text{O}$ moyen par mine ou région (‰, SMOW)	δD eau de l'émeraude (‰, SMOW)	Teneur en eau de l'émeraude (% poids)	Références	
Minas Gerais	Capoeirana	CAP14-1	6,3	6,2 ± 0,06	-40,0	2,57	1, 2	
		CAP14-2	6,2				1	
		Fallick et al	6,2				3	
	Itabira	Fallick et al	7,0 ± 0,3		-45,0 ± 2		3, com. personnelle	
	Santana des Ferres	FER-1	7,9		-55,6	1,62	1, 4	
Piteiras		Pit-1	6,65	6,8 ± 0,1	-39,5	2,19	4	
		Pit-2	6,9		-37,0	2,35	"	
		Pit-3	6,9		-35,0	2,37	"	
		Pit-4	6,7		-40,1	2,39	"	
		Pit-5	6,9		-38,8	2,38	"	
		Pit-6	6,7		-30,1	2,36	"	
						-36,7 ± 4	2,34 ± 0,1	
Bahia	Carnaíba	Quadrilatère Ferrifère		6,8 ± 0,5				
		CAJ1	9,6	9,04 ± 0,4	-53,7	2,47	1, 5	
		BO-1	9,1				"	
		TN-1	9,1				"	
		MA-1	8,8				"	
		CAB-1	8,8				"	
		FOR-1	8,8				"	
		TV-1	8,1				"	
		LA-1	9,6				"	
		Fallick et al	9,5 ± 0,5		-52,0 ± 7		3, com. personnelle	
		Socoto	SO18		10,9	-41,0	2,53	1, 2
Fallick et al	10,4 ± 0,5		-47,0 ± 9			3, com. personnelle		
Anagé	JU-7	6,8		-35,5	1,23	1, 2		
	PO-1	7,5		-28,1	2,78	"		
Ceara	Coqui	CO-1	12,1		-41,3	2,40		
	Taua	FAB-3	8,4		-36,5	2,39	1, 4	
Goiás	Itaberaí	ITA-8	12,1		-35,4	3,16	1, 2	
	Pela Ema	PE-1	11,8		-34,8	2,88	1, 2	
	Pirenópolis	PIR-13	9,4		28,0	3,01	1, 2	
	Santa Terezinha	STA-23-1	12,4	12,2 ± 0,2	-36,1	3,13	1, 2	
		STA-23	12,0		-29,8	2,90	"	
		STA-24-1	12,1		-34,0	3,00	"	
		STA-24-2	12,4		-30,0	2,53	"	
	Perangatu	Fallick et al.	11,8		-39,0 ± 5	2,00	6	
Tocantins	Monte Santo	MS2	8,9		-41,4	2,94	4	

1= Giuliani et al. (1998); 2 = Groat et al. (2002), 3 = Fallick et al. (1994), 4 = **ce travail**, 5= Giuliani et al. (1997b),
6= Fallick and Barros (1987)

1= Giuliani *et al.* (1998); 2= Groat *et al.* (2002); 3= Fallick *et al.* (1994); 4= ce travail; 5= Giuliani *et al.* (1997b); 6= Fallick and Barros (1987).

Tableau 1 - Valeurs isotopiques de l'oxygène des cristaux d'émeraude (symbolisée par $\delta^{18}\text{O}$), de l'hydrogène de l'eau contenue dans les canaux de l'émeraude (l'eau parentale de l'émeraude, symbolisée par δD) et la teneur en eau (% poids) des émeraudes du Brésil.

Table 1: Isotope values for oxygen from the emerald crystals (symbolized by $\delta^{18}\text{O}$), for hydrogen from the water in the channels (the emerald parent water, symbolized by δD) and the water content (%weight) for Brazilian emeralds

5- Isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène de l'émeraude : l'origine des fluides minéralisateurs

5.1 Les isotopes de l'oxygène et de l'hydrogène

Les compositions isotopiques de l'oxygène et de l'hydrogène de l'émeraude sont d'excellents traceurs géographiques (Giuliani *et al.*, 1998 ; 2000) et

géologiques (Giuliani, 1997 ; Groat *et al.*, 2002). L'oxygène est extrait de la structure du cristal (oxygène structural) et l'hydrogène est extrait de l'eau piégée dans les canaux du même cristal. Les procédures analytiques d'extraction et d'analyse sont détaillées par Giuliani *et al.* (1997 ; 1998). La composition isotopique, rapport d'abondance d'un isotope lourd (et rare : ^{18}O) sur un isotope léger (et abondant : ^{16}O), est généralement

exprimée par l'écart "δ" (exprimé en pour mille, ‰) entre les rapports isotopiques de l'échantillon et d'un standard, soit $\delta^{18}\text{O} = (^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ de l'échantillon} / ^{18}\text{O}/^{16}\text{O} \text{ du standard}) - 1 \times 1000$. Pour l'hydrogène, le rapport utilisé est $\delta\text{D} = \text{D/H}$ (exprimé en pour mille, ‰). Pour l'oxygène et l'hydrogène, le standard international correspond à la valeur de l'eau de mer et est appelé SMOW (Standard Mean Ocean Water).

Six cristaux d'émeraude de la mine de Piteiras ont été analysés et comparés aux valeurs obtenues sur les autres émeraude brésiliennes (tableau 1) et par ailleurs dans le monde. Les valeurs des six cristaux d'émeraude sont comprises entre 6,65 et 6,90 ‰ (moyenne $\delta^{18}\text{O} = 6,8 \pm 0,1\text{‰}$). La variation isotopique enregistrée pour ces émeraude est insignifiante. Elle confirme à nouveau que la variation isotopique enregistrée sur une grande quantité d'émeraude provenant d'une même mine est très limitée et ne dépasse que très rarement un écart de 1 à 1,5 ‰ (Giuliani *et al.*, 1998).

Par ailleurs, ces valeurs s'intègrent parfaitement dans le domaine isotopique défini pour les émeraude provenant des autres mines de la région (tableau 1) : $6,2 \pm 0,06\text{‰}$ pour Capoeirana, 7,0 ‰ pour Belmont et par ailleurs du Quadrilatère Ferrifère : 7,9 ‰ pour Ferros. L'ensemble de ces valeurs établit, pour les émeraude du Quadrilatère Ferrifère, une moyenne de $6,8 \pm 0,5\text{‰}$ (nombre d'analyses = 11).

La figure 8 montre que ces valeurs isotopiques sont les plus légères jamais mesurées pour les émeraude brésiliennes. Elles sont comparables à celles définies pour les gisements d'Anagé (Etat de Bahia; $\delta^{18}\text{O} = 7,2 \pm 0,3\text{‰}$). Par ailleurs dans le monde, des valeurs comparables ont été mises en évidence pour les émeraude des gisements d'Habachtal en Autriche ($\delta^{18}\text{O} = 7,03 \pm 0,25\text{‰}$, $n = 15$; Giuliani *et al.*, 2001),

de Poona en Australie ($\delta^{18}\text{O} = 7,25 \pm 0,25\text{‰}$) et de Sandawana au Zimbabwe ($\delta^{18}\text{O} = 7,45 \pm 0,55\text{‰}$).

Pour les émeraude brésiliennes, les valeurs isotopiques de l'oxygène se répartissent entre 6,2 ‰ pour Capoeirana et 12,2 ‰ pour Santa Terezinha (Fig. 8). Les études antérieures ont démontré que la composition isotopique de l'oxygène de l'émeraude était contrôlée (tamponnée) par la composition isotopique de la roche originelle qui la contient (Giuliani *et al.*, 1997a, b). Ainsi, à Capoeirana et Piteiras, les roches encaissantes sont des roches ultramafiques e.g. type péridotites dont l'intervalle isotopique est compris entre 5,0 et 8,0 ‰ (moyenne $\delta^{18}\text{O} = 6,5\text{‰}$; Kyser, 1986), en conséquence les valeurs isotopiques des émeraude sont les plus légères jamais rencontrées sur

Terre. Pour Santa Terezinha, les talcschistes carbonatés possèdent des valeurs supérieures à 12 ‰ et par conséquent les valeurs isotopiques des émeraude sont plus lourdes. Pour les gisements d'émeraude strictement associés à la présence de pegmatites comme celles de Carnalba dans l'Etat de Bahia ($\delta^{18}\text{O} = 9,0 \pm 0,1\text{‰}$), l'effet tampon de l'oxygène est réalisé par la composition isotopique des deux roches qui contiennent l'émeraude, la pegmatite ($\delta^{18}\text{O}$ compris entre 8 et 13 ‰ pour des pegmatites issues de magmas aluminieux) et la roche mafique-ultramafique ($\delta^{18}\text{O}$ compris entre 5,0 et 8,0 ‰).

Ces considérations géochimiques ouvrent le débat sur l'origine et la nature des fluides parents de l'émeraude pour les gisements de Piteiras et Capoeirana. Les isotopes de l'hydrogène-

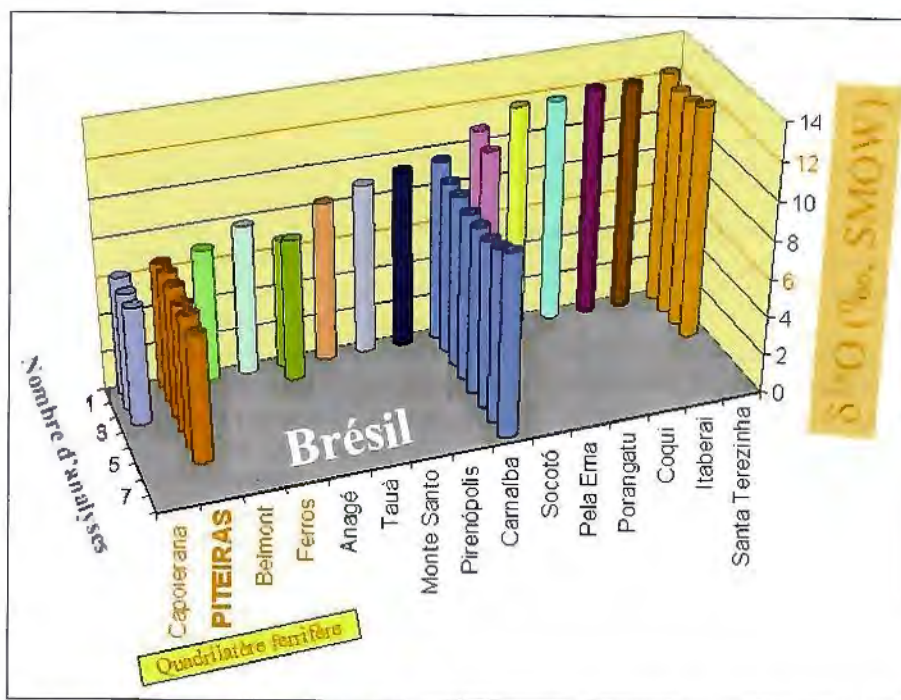


Fig. 8 Histogramme des rapports isotopiques de l'oxygène des émeraude brésiliennes ($\delta^{18}\text{O}$, ‰ par rapport au SMOW). Les valeurs isotopiques obtenues pour les émeraude de Capoeirana, Piteiras et Belmont sont les plus légères au monde.

Oxygen isotopic ratio histogram of the Brazilian emeralds ($\delta^{18}\text{O}$, ‰ relative to SMOW). The oxygen isotopic ratio obtained for the Capoeirana, Piteiras and Belmont emeralds are the lightest ever found in the world.

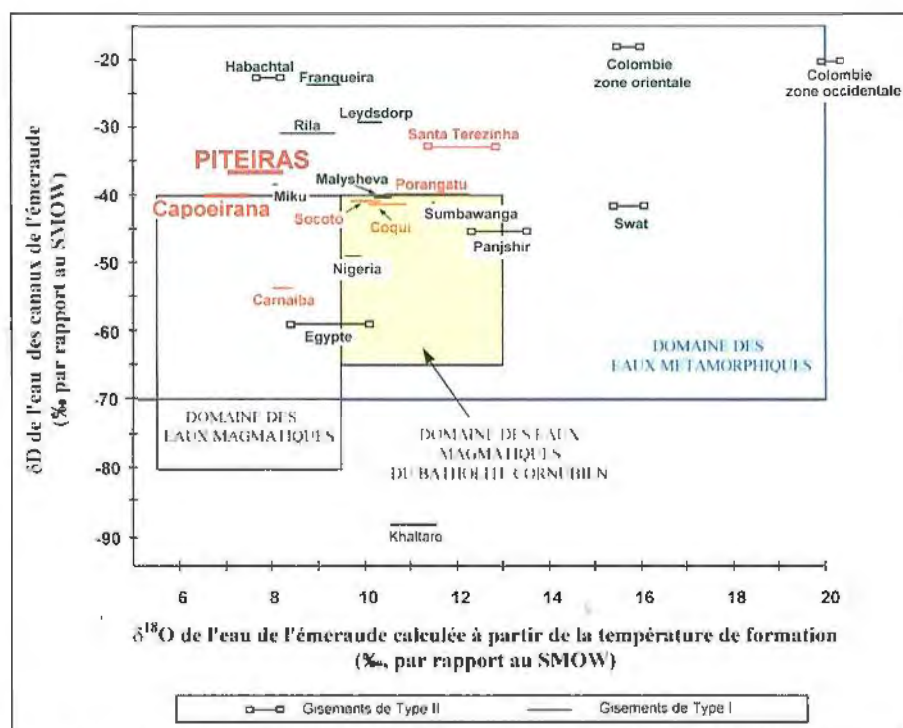


Fig. 9 - Diagramme des compositions isotopiques de l'eau parentale contenue dans les émeraudes du Brésil et d'autres gisements mondiaux. Ces compositions permettent de préciser l'origine du fluide nourricier de l'émeraude. Les domaines magmatique et métamorphique définis suivant des données internationales sont également reportés. Le rapport isotopique δD de l'eau des canaux de l'émeraude correspond à la composition isotopique de l'hydrogène de l'eau contenue dans l'émeraude. Le rapport isotopique $\delta^{18}O$ de l'eau de l'émeraude correspond à la valeur de la composition de l'oxygène de cette même eau calculée à partir des températures de formation de l'émeraude et de la composition isotopique de l'oxygène du cristal. Les températures sont obtenues par les études d'inclusions fluides. Les intervalles de températures utilisés pour chacun des gisements sont précisés dans Groat et al., (2002). Les températures de formation définies pour l'émeraude de Capoeirana ($T = 450-650^{\circ}C$; Souza et al., 1992) ont été également utilisées pour l'émeraude de Piteiras. Les gisements du Brésil sont reportés en rouge. Les gisements de type I correspondent aux gisements associés spatialement à des pegmatites ; les gisements de type II correspondent aux gisements reliés à des structures tectoniques bien identifiées.

Channel $\delta D-H_2O$ versus calculated $\delta^{18}O-H_2O$ (‰, SMOW) diagram for samples of Piteiras and emeralds from other deposits in Brazil and in the world (data in Table 1 and in Groat et al., 2002). The field for the Piteiras emeralds is calculated for the temperature ranges given by the fluid inclusion study of Souza et al., (1992) on the Capoeirana deposit ($T = 450-650^{\circ}C$).

ne et les températures de formation de l'émeraude vont nous permettre d'en débattre.

La signature isotopique de l'hydrogène de "l'eau structurale" c'est-à-dire de l'eau contenue dans les canaux du cristal (l'eau parentale de l'émeraude) pour les six cristaux de Piteiras, a des valeurs comprises entre -40,1 et -30,1‰ (moyenne de $\delta D = -36,7 \pm 4\%$; tableau 1). Ces valeurs indiquent pour l'émeraude de Piteiras une contribution d'eau d'origine métamorphique et non pas d'origine magmatique (Fig. 9). Cet intervalle de valeurs intègre celle obtenue pour l'émeraude de Capoeirana ($\delta D = -40\%$). La valeur obtenue pour l'émeraude de Ferros ($\delta D = -55,6\%$) ne nous permet pas de trancher entre les deux origines possibles.

La teneur en eau des émeraudes de Piteiras est comprise entre 2,19 et 2,39% poids (Fig. 10). Ces teneurs sont comparables à celles mesurées pour Capoeirana (2,57% poids) mais bien différentes de celle de Ferros (1,62 % poids). La teneur en eau des canaux de l'émeraude est proportionnelle à la quantité de sodium incorporée dans ces mêmes canaux (Giuliani, 1997). Par ailleurs, la teneur en sodium est étroitement corrélée aux substitutions du magnésium et d'autres éléments de transition tels le chrome et le vanadium, avec l'aluminium dans le site octaédrique du cristal. Ainsi, plus la teneur en eau est élevée plus les teneurs soit en chrome et vanadium, soit en magnésium ou fer, seront élevées. La figure 11 nous permet de visualiser la variation

de la teneur en eau des émeraudes de Piteiras avec celle des autres émeraudes répertoriées sur la planète. Les valeurs supérieures à 2% du poids en eau correspondent à des cristaux pour lesquels les substitutions (notamment celles concernant les chromophores de l'émeraude) dans le site octaédrique de la structure de l'émeraude sont importantes.

5.2 Nature et origine des fluides parents de l'émeraude

L'étude des inclusions fluides primaires (IF) piégées par les émeraudes permet de caractériser leur fluide nourricier. Les études menées par Souza (1988, 1990) sur les émeraudes de Belmont et par Souza et al., (1992) sur celles de Capoeirana démontrent que les inclusions fluides sont identiques pour les deux gisements. Il est fort probable que les inclusions fluides primaires piégées par l'émeraude de Piteiras possèdent les mêmes caractéristiques (même contexte géologique, même association minérale et mêmes valeurs isotopiques pour les trois gisements).

A la température du laboratoire, les IF sont à trois ou plusieurs phases (respectivement tri- et multiphasées). Ce sont des inclusions appartenant au système H_2O-CO_2-NaCl avec des rapports du volume CO_2 /volume total de l'inclusion de l'ordre de 0,7. Les températures de fusion de la glace carbonique indiquent la présence d'autres éléments volatils dans la phase gazeuse qui n'ont pas été identifiés (méthane, azote ?). Les températures d'homogénéisation des IF sont comprises entre 320 et 520°C. La salinité du fluide est comprise entre 11,5 et 19% poids équivalent NaCl. Les conditions de piégeage du fluide sont estimées à une pression de 2 à 2,75 kilobars et à une température comprise entre 450 et 650°C.

Par ailleurs, les données microthermométriques obtenues sur les inclusions fluides piégées par les feldspaths (microcline) des granites "Borrachudos" (Fig. 2), situés au contact des gisements d'émeraude (Schorscher et Leterrier, 1980 ; fluides à $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$, pression : 1,5-2,5 kilobars et température : 350-450°C), montrent que ces fluides ne s'inscrivent pas dans le domaine pression-température défini par Souza *et al.*, (1992) pour les émeraudes. Ainsi, ces deux phénomènes semblent totalement déconnectés temporellement.

Ces résultats sont confortés par les données isotopiques qui démontrent que les fluides en équilibre avec l'émeraude pour les températures définies par Souza *et al.* (1992) soit $450 < T < 650^\circ\text{C}$, sont d'origine exclusivement métamorphique pour Piteiras et sans aucun doute pour Capoeirana (Fig. 9). Les granites et les pegmatites n'ont joué aucun rôle dans la formation de l'émeraude. Cette conclusion est similaire à celles obtenues pour la genèse des émeraudes de Coqui (Etat du Ceará), Porangatu et Santa Terezinha (Etat du Goiás) ainsi que celles de Socotó (Etat de Bahia).

En effet, l'association d'une "pegmatite" (au sens large) et d'une émeraude ne signifie pas que le fluide parent de l'émeraude soit obligatoirement d'origine magmatique. Dans quasiment tous les exemples étudiés, les pegmatites ont subi une forte altération chimique induite par la circulation de fluides soit contemporains, soit postérieurs à leur mise en place. Ces fluides sont le plus souvent d'origine métamorphique comme par exemple ceux associés à l'émeraude de Rila en Bulgarie (Alexandrov *et al.*, 2001), de Franqueira en Espagne ou de Leydsdorp en Afrique du Sud (Fig. 9). Ils provoquent la remobilisation des éléments chimiques contenus dans la pegmatite et très souvent du béryllium.

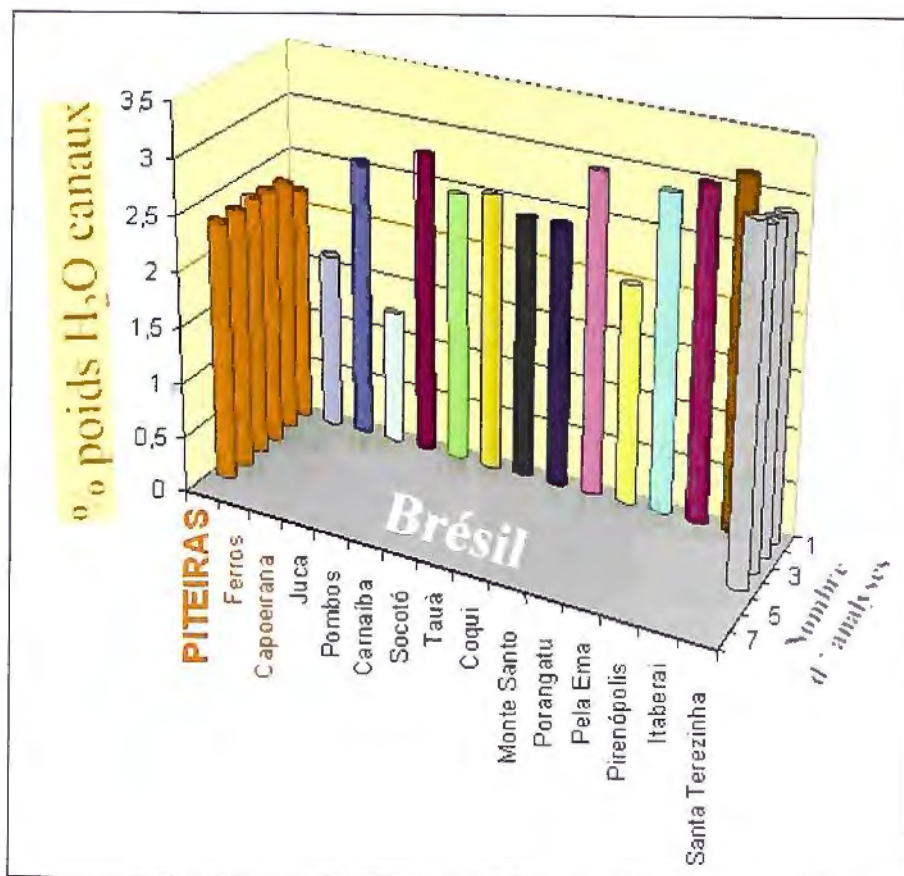


Fig. 10 Histogramme de la quantité d'eau contenue dans les émeraudes du Brésil (en % poids). La quantité d'eau contenue dans les inclusions fluides observables sous le microscope est négligeable. Elle représente à peu près 0,1% poids de la quantité totale de l'eau totale contenue dans une émeraude. Pour toutes nos expériences, cette eau a été préalablement éliminée par décrepitation, à 550°C, des inclusions fluides.

Histogram of the water content in Brazilian emeralds (in weight %). The amount of water from fluid inclusions is negligible (about 0,1 % of the water).

La typologie proposée par Giuliani *et al.*, (1997a), fondée sur la présence ou l'absence de pegmatites granitiques, repose sur les associations pétrologiques observées sur le terrain mais elle ne possède aucune connotation génétique. Seules les données d'isotopes stables de l'oxygène, de l'hydrogène et du soufre sur l'émeraude et/ou de ses minéraux accompagnateurs (phlogopite, pyrite, molybdénite par exemple), couplées aux températures de piégeage des fluides obtenus par l'étude des inclusions fluides, permettront de certifier l'origine parentale des fluides de

l'émeraude (magmatique, métamorphique ou de mélange).

Dans les exemples de Piteiras, de Capoeirana et d'Itabira les fluides sont strictement d'origine métamorphique même si des pegmatites sont spatialement et/ou directement associées à l'émeraude. Ces fluides ont circulé à la faveur de décollement liés à l'orogénèse *Brasiliano* (508 millions d'années) ; ils ont altéré des roches mafiques d'âge protérozoïque et des pegmatites d'âge inconnu (Fig. 12). Ces interactions entre fluides et roches ont provoqué la mobilisation locale du chrome, magné-

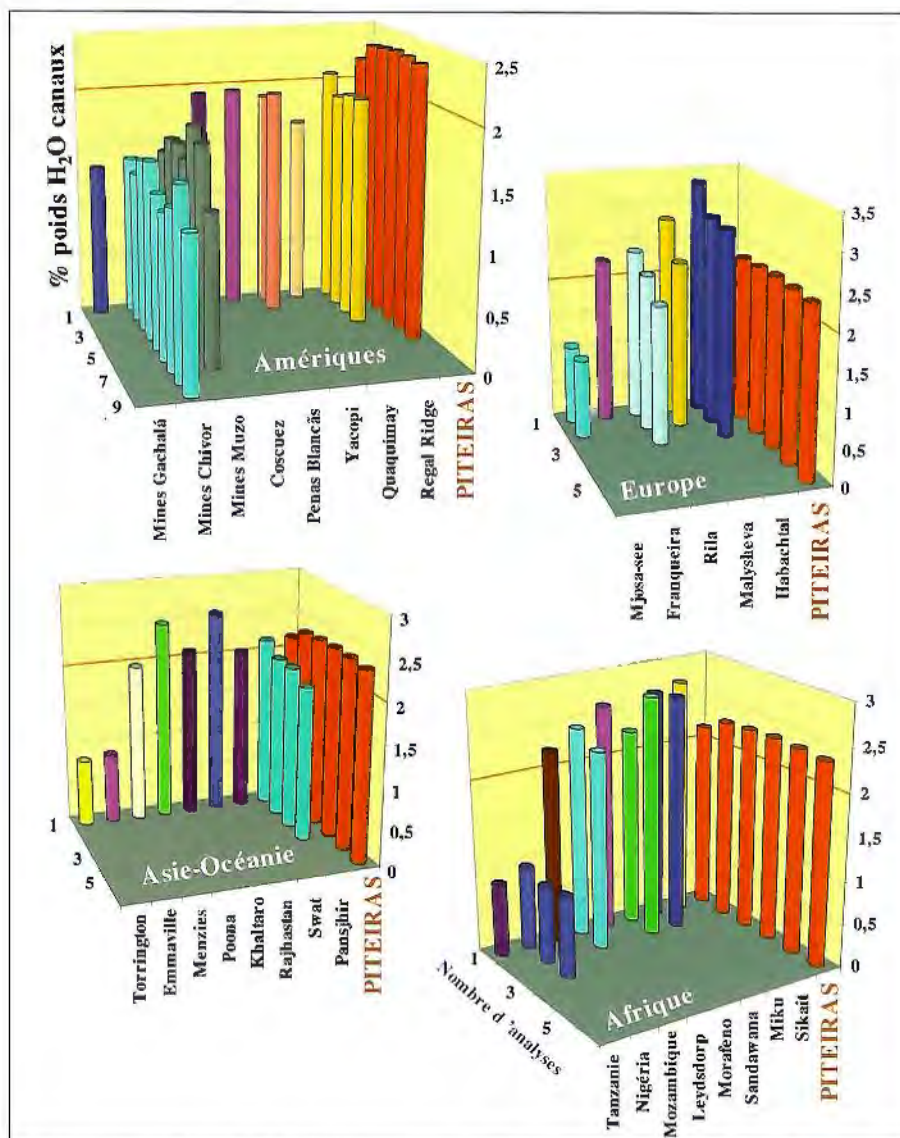


Fig. 11 - Histogramme de la quantité d'eau contenue dans la plupart des émeraude connues au monde. Dans chaque histogramme, les émeraude de Piteiras sont reportées en référence. Le détail des données est précisé dans Groat et al., (2002). Histogram of channel water content for different emeralds worldwide. For each histogram, the Piteiras emeralds are reported for comparison. The data are detailed in Groat et al., (2002).

sium, fer et vanadium contenus dans les roches ultramafiques. Par le manque de traceurs géochimiques et isotopiques, la source du béryllium sera toujours débattue : locale par mobilisation de cet élément dans des pegmatites ou distale par la fusion partielle de la croûte inférieure avec expulsion de fluides riches en béryllium migrant à la faveur de grands

cisaillements et de décollements.

6- Caractéristiques gemmologiques des émeraude de Piteiras

L'étude des caractéristiques gemmologiques des émeraude de Piteiras a été effectuée sur un échantillonnage d'une centaine d'échantillons, 12 facettés, le reste brut.

Les indices mesurés s'inscrivent dans une fourchette de 1.580 - 1.587 à 1.589 - 1.591, un échantillon présentant un indice de 1.580 - 1.591 et la biréfringence la plus élevée de l'échantillonnage étant : 1,1‰. La masse spécifique, dite "densité", est comprise entre 2.653 et 2.794. Aucune luminescence sous rayonnement ultraviolet n'a été constatée, aussi bien aux UVL qu'aux UVC.

Les nuances de vert présentées par les émeraude de Piteiras s'inscrivent dans la variation habituelle des émeraude du Brésil. Le pléochroïsme est moyen à prononcé. La couleur y est souvent distribuée en zonations, soit par changement de couleur (vert et vert-jaune ; Fig. 13), soit par variation d'intensité (vert - vert pâle ; Fig. 14). Comme on peut s'y attendre, ces zonations sont globalement toujours parallèles aux faces du prisme. Deux échantillons montrent des discrètes zonations perpendiculaires à l'axe optique. Au chapitre des zonations, on notera que les cristaux opaques à translucides de Piteiras présentent régulièrement à leur périphérie et parallèlement aux faces du prisme des couches gemmes, souvent multiples, montrant des alternances de teinte et/ou d'intensité de couleur (Fig. 15). Ces couches gemmes reprennent l'orientation des faces du prisme mais peuvent, lorsqu'elles se répètent, montrer des écarts d'orientation les unes par rapport aux autres. Cet écart peut atteindre 15 à 20° d'arc entre deux couches. Les écarts constatés ne modifient que l'angle formé entre deux faces du prisme, les couches restant parallèles à l'axe optique. Ils peuvent être imputés à des cycles de croissance après dissolution.

Les cristaux d'émeraude de Piteiras sont de très classiques prismes du premier ordre, avec quelques faces pyramidales. Ceci confirme que ces cristaux sont passés par des cycles de croissance puis dissolution, les faces pyramidales apparaissant à la reprise de la croissance.

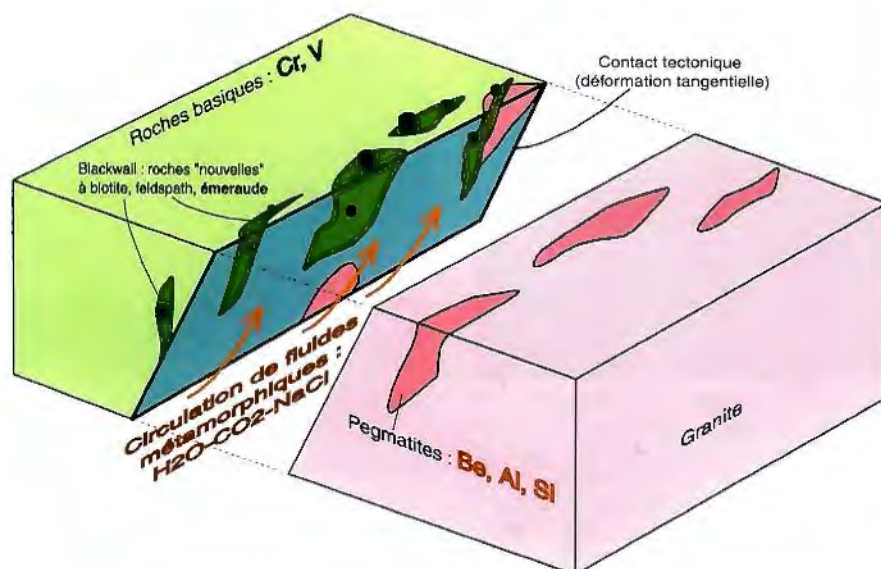


Fig. 12 - Schéma génétique proposé pour la formation des émeraudes de Piteiras-Capoeirana Belmont. Les fluides hydrothermaux, d'origine métamorphique (flèches rouges), circulèrent durant l'orogénèse Brasiliense (il y a 508 millions d'années) suivant le plan de contact (zone tectonique majeure de la région) entre des granites déformés (dont les pegmatites contiennent du béryllium) et des roches basiques (riches en chrome et vanadium). Les fluides en réagissant avec les deux roches mettent en solution tous les éléments chimiques nécessaires à la cristallisation de l'émeraude (Be, Al [Cr, V, Mg, Fe, Na, H₂O, etc...], Si, O). Le résultat final de cette interaction fluide-roche est la production de nouvelles roches qui peuvent contenir l'émeraude à savoir des feldspathites (anciennes pegmatites dont le quartz a été dissous et remplacé par du feldspath) et des schistes à phlogopite (l'équivalent du blackwall ou des schistes à phlogopite ou des phlogopites de certains auteurs) qui se sont formés à l'insu des roches basiques.

Schematic diagram of the formation of the Piteiras-Capoeirana-Belmont emeralds. The hydrothermal fluids, metamorphic in origin (red arrows), percolated during the Brasiliense orogenesis (508 millions years ago) at the tectonic interface between the deformed granites (which contain Be-bearing pegmatites) and basic rocks containing chromium and vanadium. The fluids interacted with both rocks and the resulting solution contained all the elements necessary for emerald crystallization (Be, Al [Cr, V, Mg, Fe, Na, H₂O, etc...], Si, O). Emerald crystallized in feldspathites (rock resulting from the transformation of the pegmatite by dissolution of quartz and feldspar precipitation) and in biotite schists (called also blackwall or phlogopite schist or phlogopite).

ce après dissolution (Sunagawa et Urano, 1999). La morphologie de quelques cristaux que nous avons reçus n'est pas très "lisible". Tous présentaient des marques d'imbrication avec d'autres cristaux d'émeraude ou avec l'environnement. Les quelques faces propres observées étaient marquées d'empreintes de cristaux de phlogopite (Fig. 16). Un certain nombre de marques de dissolution de faible relief et/ou de croissance inachevée (Fig. 17) est visible.

Inclusions fluides : Les cavités des émeraudes de Piteiras contiennent toutes des phases liquides, gazeuses et solides. Elles se subdivisent en trois

catégories morphologiques.

Première catégorie: Cavités d'apparence rectangulaire plus ou moins épaisses à quasi cubiques (Fig. 18). Ces cavités sont généralement présentes dans des domaines relativement restreints, en groupes de quelques individus à plusieurs dizaines. Ce sont les plus fréquentes. Elles contiennent trois phases (solide, liquide et gazeuse) (Fig. 19). La phase solide est représentée par plusieurs espèces minérales anisotropes en lumière polarisée. On y rencontre souvent un minéral isotrope dont la morphologie rappelle la sylvite. Soumise à la chaleur, la libelle de CO₂ disparaît à 29°C sous l'effet de la dilatation

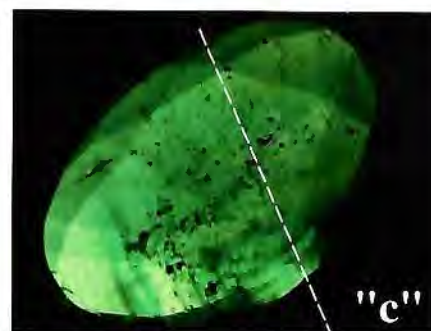


Fig. 13 - Les pierres de couleur pâle montrent des zonations vertes et vert-jaune marquées. Diascopie, immersion, 10x. Photo Gemtechlab.

Lightly-colored stones have marked green to yellow-green zonations. Diascopy, immersion, 10x.



Fig. 14 - Interface d'une zonation de couleur de type vert-vert pâle. Diascopie, 50x. Photo Gemtechlab.

Green to pale green zonings. Diascopy, 50x.



Fig. 15 - Certains cristaux pas ou peu transparents présentent à leur périphérie et parallèlement aux faces du prisme des couches gemmes, souvent multiples, montrant des alternances de teinte et/ou d'intensité de couleur. Sur ce cliché, le groupe de couches externes (à droite) ne présente pas tout à fait la même orientation que la précédente dont elle est séparée par une zone non gemme. Diascopie, lumière polarisée (//), 20x. Photo Gemtechlab.

Some crystals that are little or not transparent have gem layers at their periphery, parallel to the prism faces. Those gem layers are often many, with varied nuances and intensity of color. In this picture, the external group of layers is not strictly parallel to the previous one, from which it is separated by a non-gem layer. Diascopy, polarized light (//), 20x.

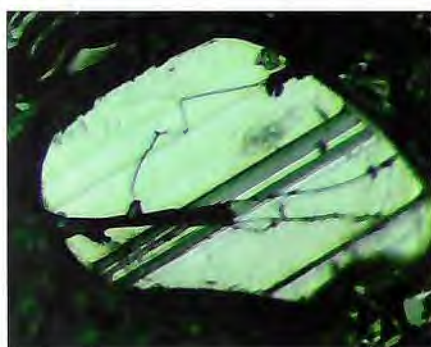


Fig. 16 - Empreinte d'un cristal de phlogopite à la surface d'une émeraude de Piteiras. Lumière réfléchie, 120x. Photo Gemtechlab.
Cast of a phlogopite crystal on the surface of a Piteiras emerald. Reflected light, 120x.

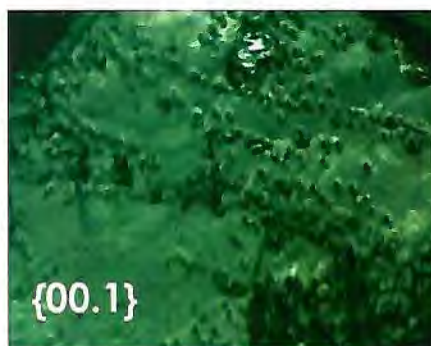


Fig. 17 - Pinacorde {001} avec figures de dissolution. Episcopie, 30x. Photo Gemtechlab.
Basal face {001} with etch patterns. Episcopy, 30x.

du CO₂ liquide. Ces cavités peuvent ne pas contenir de phases solides. Lorsque ces cavités sont clairement rectangulaires, elles peuvent s'orienter selon deux directions se croisant à 90°. Ces pseudo directions ne sont probablement que deux directions "d'allongement" des cavités (Fig. 20).

Deuxième catégorie : Canaux très fins. d'un diamètre de 3 à 7 µm pour une longueur de 30 à 600 µm, orientés selon l'axe optique.

Ces canaux peuvent être réguliers (Fig. 21) ou fusiformes, présentant alors toujours un épaississement correspondant à la présence d'inclusions solides (Fig. 22). A partir du segment épaissi, le canal se rétrécit et s'achève

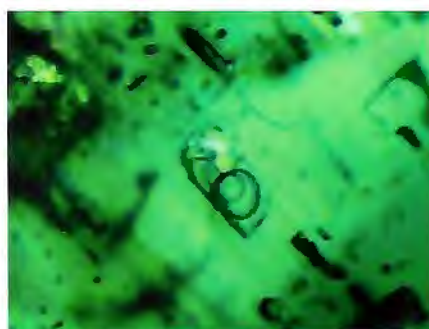


Fig. 18 - Les émeraude de Piteiras présentent souvent des domaines comportant une grande densité d'inclusions multiphasées. Ces inclusions sont généralement de morphologie plus ou moins rectangulaire. Elles contiennent un ou plusieurs solides, de l'eau (ou saumure) et du CO₂ liquide et gazeux. Diascopie, immersion, lumière polarisée (⊗), 100x. Photo Gemtechlab.
Piteiras emeralds often contain domains with large number of multiphase inclusions. These inclusions are typically almost rectangular. They contain one or more solids, water (or brine) and liquid and gaseous CO₂. Diascopy, immersion, polarized light (⊗), 100x.

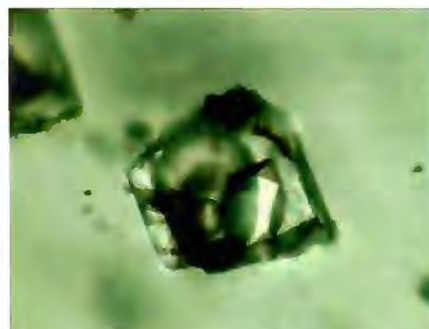


Fig. 19 - Cavité contenant H₂O, CO₂ liquide, CO₂ gazeux et un solide qui malgré sa ressemblance apparente avec du quartz est un feldspath. Lumière polarisée (//), 500x. Photo Gemtechlab.
Cavity containing H₂O, liquid CO₂, gaseous CO₂ and a solid which is a feldspar despite its quartz appearance. Polarized light (//), 500x.

en pointe légèrement arrondie.

Ces canaux sont toujours rectilignes et ont un "point de départ" sous la forme d'une inclusion minérale qui le génère par "effet d'ombre" (blocage ponctuel de la croissance). Ils contiennent des séquences multiples de phases (Fig. 21). On peut observer jusqu'à une trentaine de changements de phase le long d'un même canal.

Au sein d'un même échantillon, les rapports volumiques H₂O / CO₂ liquide peuvent varier de 1 à 4. Toujours à température égale et dans un même échantillon, le rapport volumique CO₂ gazeux / CO₂ liquide peut varier de 0.03 à 1 (Fig. 23).

Troisième catégorie : Cavités de forme rectangulaire mais très plates (Fig. 24).

Elles contiennent les mêmes phases que les autres cavités. On les reconnaît à la courbure prononcée de l'interface H₂O (convexe) / CO₂ liquide (concave). Ce type de cavité est plus rare.

Inclusions solides : Nombre d'inclusions se retrouvent dans les émeraude de Piteiras. Cette variété obère quelque peu la possibilité de caractériser cette origine de manière tout à fait fiable sur la base de leur examen. Néanmoins, la nature et les caractéristiques morphologiques de certaines d'entre elles peuvent, dans certains cas, représenter un indice non négligeable.

Les émeraude de Piteiras contiennent de la pyrrhotite sous forme de fins feuilletés (Fig. 25) formant parfois des dendrites. D'autres dendrites de couleur brune sont visibles (Fig. 26), il s'agit fort probablement de produits d'altération de pyrrhotite (i.e. pyrrhotite → pyrite → pseudomorphose en limonite).

D'une manière caractéristique pour le



Fig. 20 - Inclusions allongées montrant deux orientations se croisant à 90°. Diascopie, 400x. Photo Gemtechlab.
Elongated inclusions with two principal orientations at right angle. Diascopy, 400x.

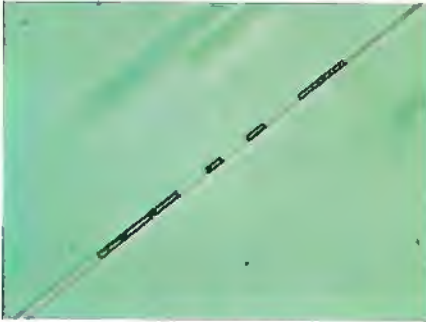


Fig. 21 - Inclusion multiphase à séquences complexes dans un canal, dans l'ordre, de gauche à droite: H₂O - trois solides - CO₂ liquide - CO₂ gazeux - CO₂ liquide - H₂O - deux solides - CO₂ gazeux - H₂O - CO₂ liquide - H₂O - CO₂ liquide - CO₂ gazeux - CO₂ liquide - H₂O. Diamètre du canal: Ø 6 µm. Diascopie, lumière polarisée (//), 400x. Photo Gemtechlab.

Multiphase inclusion with a complex sequence in a channel, from left to right: H₂O - three solids - liquid CO₂ - gaseous CO₂ - liquid CO₂ - H₂O - two solids - gaseous CO₂ - H₂O - liquid CO₂ - H₂O - liquid CO₂ - gaseous CO₂ - liquid CO₂ - H₂O. 6 µm diameter channel. Diascopy, polarized light (//), 400x.

gisement de Piteiras, on rencontre régulièrement de l'albite sous diverses formes. Ainsi certaines cavités sont entourées de domaines présentant des petits cristaux d'albite d'apparence grenue et légèrement arrondie (Fig. 27). L'albite se rencontre aussi sous forme de voiles formés de petits cristaux (Fig. 28). La morphologie de ce minéral au sein des émeraude de Piteiras est donc variable et peut prendre d'autres apparences. La plus fréquente est celle de masses incolores de morphologie indistincte (Fig. 29). Dans ce cas, l'albite a été identifiée par spectrométrie Raman (Fig. 30). On la retrouve également sous la forme de cristaux incolores bien formés pouvant être complètement pris dans la masse (Fig. 31 et 32). La figure 33 présente un cristal d'albite extrait d'une émeraude de Piteiras. La figure 34 y montre, en lumière polarisée, les couleurs du premier, deuxième et troisième ordre provoquées par les inclusions de l'albite.

Les figures 35 et 36 représentent un cristal d'actinolite. Sous cette morpho-

logie, c'est une inclusion peu courante, mais connue de l'émeraude. On la rencontre notamment au Pakistan (à Chahbagh et Khaltaro, Gübelin E. in Kazmi A.H. *et al.*, 1989). Détail intéressant, elle y est décrite comme étant associée à des masses blanchâtres et irrégulières d'albite. Ce spécimen de Piteiras présente, en lumière polarisée, une couleur jaune orangé du deuxième ordre pour une épaisseur de 150 µm. Les conditions de stabilité de l'actinolite en termes de pression et température (< 540°C; < 3 kbar) s'inscrivent dans les valeurs rencontrées à Piteiras (± 450-650°C; 2-2.75 kbar).

7- Analyses chimiques

Les analyses à dispersion d'énergie ont été effectuées sur un microscope électronique à balayage (MEB) JEOL-5800LV, équipé d'un détecteur à dispersion d'énergie PGT (Princeton Gamma Tech) IMIX-PTS, à l'Institut des Matériaux Jean Rouxel à Nantes. Ce détecteur utilise un cristal

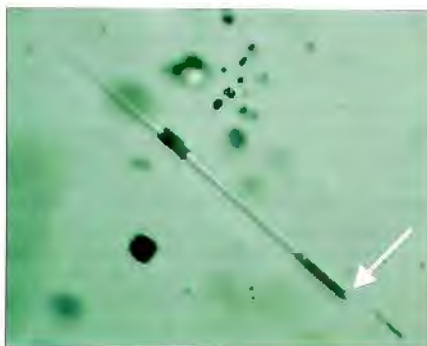


Fig. 22 - Canal fusiforme contenant des phases solides, liquides et une phase gazeuse. En bas à droite se trouve une phase solide, incolore (flèche), qui a provoqué la création du canal par "effet d'ombre". Dimensions du canal: Ø 6 µm / L 294 µm. Diascopie, lumière polarisée (//), 400x. Photo Gemtechlab.

Elongated spindle-shaped channel with several solid and liquid phases and one gaseous phase. At the bottom right is a colorless solid inclusion (arrow) which created the channel as a result of growth blockage. Ø 6 µm / L 294 µm. Diascopy, polarized light (//), 400x.



Fig. 23 - Dans un même échantillon et à température égale, le rapport des volumes occupés par les deux phases du CO₂ n'est pas constant. Si, souvent, la phase gazeuse forme de petites libelles représentant de 3 à 5% du volume de la phase liquide, certains canaux comme celui-ci présentent un rapport des deux phases plus ou moins égal à 1. De gauche à droite: Solide - H₂O - solides - H₂O - CO₂ liquide - H₂O - CO₂ liquide avec une grande libelle de CO₂ gazeux (flèche) - H₂O - CO₂ liquide. Dimensions du canal: Ø 7 µm / L 263 µm. Diascopie, lumière polarisée (//), 400x. Photo Gemtechlab.

In the same sample and at the same temperature, the ratio of the volume occupied by the two phases of CO₂ is not constant. If often the gaseous phase forms small bubbles representing about 3 to 5% of the liquid phase, some channels, such as the one in the picture, have a ratio of about 1. From left to right: Solid - H₂O - solids - H₂O - liquid CO₂ - H₂O - liquid CO₂ with a large bubble of gaseous CO₂ (arrow) - H₂O - liquid CO₂. channel dimensions: Ø 7 µm / L 263 µm. Diascopy, polarized light (//), 400x.



Fig. 24 - Cavité allongée et plate contenant de gauche à droite: quatre solides dans du CO₂ liquide - H₂O - CO₂ liquide avec libelle de CO₂ gazeux. Dimensions: 9 µm / 96 µm. Diascopie, lumière polarisée (⊗), 500x. Photo Gemtechlab.

Flat elongated cavity containing (from left to right): four solids in liquid CO₂ - H₂O - liquid CO₂ with gaseous CO₂. Dimensions: 9 µm / 96 µm. Diascopy, polarized light (⊗), 500x.



Fig. 25 - Inclusion de pyrrhotite de morphologie feuilletée. Episcopie, 50x. Photo Gemtechlab
Foliated pyrrhotite inclusions. Episcopy, 50x

de Ge "haute résolution" (115 eV) et une fenêtre ultrafine en polymère. Le MEB opère avec une tension d'accélération de 20 kV, un courant d'1 nA, et un angle de vue du détecteur de 37°. Les résultats sont présentés dans le tableau I. Des analyses ont été effectuées sur deux émeraudes jugées typiques de la production (Tableau II).

Les teneurs relativement élevées et à peu près homogènes sur un échantillon de sodium (Na) et magnésium (Mg) sont typiques des émeraudes naturelles (Stockton, 1984). La teneur en fer (Fe) est forte (ce qui est normal puisque le gisement est situé dans le Quadrilatère Ferrifère), et suffisante pour éliminer toute fluorescence. L'élément chromophore principal détecté est le chrome (Cr), le fer n'intervenant dans la couleur que dans

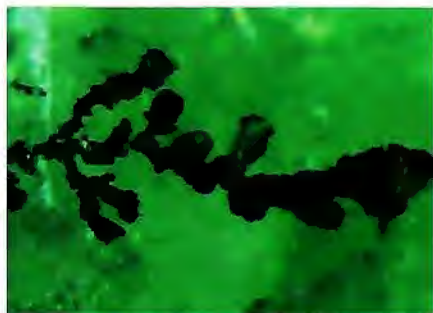


Fig. 26 - Inclusion dendritique. Diascopie, 50x. Photo Gemtechlab
Dendritic inclusion. Diascopy, 50x.

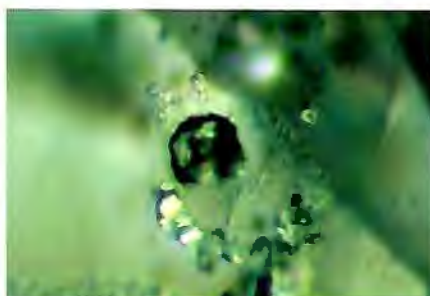


Fig. 27 - Certaines cavités sont entourées de cristaux d'albite, d'apparence partiellement dissous, formant des domaines turbides. Diascopie, lumière polarisée (⊗), 30x. Photo Gemtechlab.

Some cavities are surrounded by albite crystals of partially dissolved appearance, creating a turbid field. Diascopy, polarized light (⊗), 30x.



Fig. 28 - Petits cristaux d'albite formant un voile. Diascopie, lumière polarisée (//), 400x. Photo Gemtechlab.
Small albite crystals forming a veil. Diascopy, polarized light (//), 400x.

une très faible mesure. Le vanadium (V) est absent de tous nos échantillons.

8. Analyses de spectrométrie d'absorption

Spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF)

Les spectres réalisés mettent clairement en évidence la présence du CO₂ par les absorptions à 2358 et 2292 cm⁻¹. Pour le rayon extraordinaire, l'absorption à 2358 cm⁻¹ est souvent masquée par l'absorption structurale de l'émeraude, c'est donc dans le rayon ordinaire que l'on voit le mieux cette absorption. Inversement, l'autre absorption du



Fig. 29 - Inclusion d'albite incolore de morphologie indistincte. Episcopie, 160x. Photo Gemtechlab.
Colorless albite inclusion of indistinct morphology. Episcopy, 160x.

CO₂ à 2292 cm⁻¹ s'observe dans le rayon extraordinaire. Cette absorption très fine nous rend compte d'une teneur élevée de CO₂ ce qui est présentement le cas.

L'eau moléculaire se manifeste dans deux régions du spectre : vers 3400 – 4000 cm⁻¹ il y a une très forte absorption de l'eau moléculaire contenue dans les inclusions fluides ; et à 5275 cm⁻¹ (1895 nm) une absorption fine correspondant à l'eau moléculaire de type II, liée aux alcalins (ce qui est normal puisque les analyses chimiques montrent une concentration élevée en alcalins ; Fig. 37).

Pour les laboratoires, la spectrométrie infrarouge est un outil efficace pour identifier les substances utilisées dans le cadre du remplissage des fis-

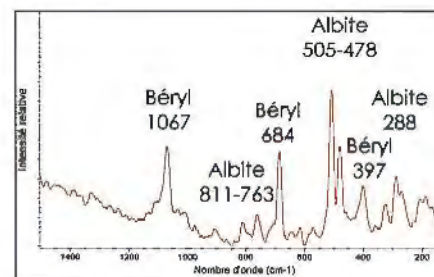


Fig. 30 - Spectre FT-Raman d'une inclusion d'albite incolore de morphologie indistincte (voir Fig. 29).
FT-Raman spectrum of a colorless albite inclusion of indistinct morphology (see Fig. 29)

Eléments	Em1 % poids	Em1 % pds oxyde	Em2 % poids	Em2 % pds oxyde
O	42,29	0,00	42,08	0,00
Na	1,06	1,43	1,17	1,58
Mg	1,10	1,82	1,19	1,97
Al	8,09	15,29	7,90	14,93
Si	29,65	63,43	29,52	63,15
V	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr	0,21	0,31	0,16	0,23
Fe	0,44	0,57	0,56	0,72

Tableau II - Analyses chimiques de deux émeraude typiques de Piteiras. Le total n'atteint pas 100% puisque l'on ne mesure ni le béryllium, ni l'eau.

Table II: Chemical analyses of two typical Piteiras emeralds. The total does not reach 100% since beryllium or water are not measured.



Fig. 31 - Cristal d'albite (160 µm) avec des inclusions montrant des couleurs d'interférence du premier ordre (orange). Diascopie, lumière polarisée (⊗), 400x. Photo Gemtechlab.

Albite crystal (160 µm) with inclusions showing first-order interference colors (orange). Diascopy, polarized light (⊗), 400x.



Fig. 32 - Cristal d'albite prolongé (à droite) par une cavité contenant du CO₂ liquide. La longueur apparente de l'albite est parallèle à l'axe "c" de l'émeraude. Diascopie, lumière polarisée (⊗), 400x. Photo Gemtechlab.

Albite crystal prolonged (right) by a cavity containing liquid CO₂. The elongation of the albite crystal is parallel to the emerald "c" axis. Diascopy, polarized light (⊗), 400x.



Fig. 33 - Cristal d'albite dans l'émeraude. Episcopie, 35x. Photo Gemtechlab.

Albite crystal in the emerald. Episcopy, 35x.

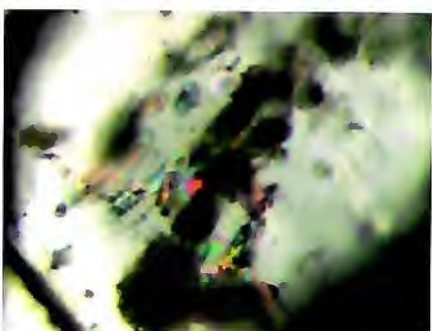


Fig. 34 - Inclusions du même cristal d'albite. Diascopie, immersion, lumière polarisée (⊗), 100x. Photo Gemtechlab.

Inclusions of the same albite crystal. Diascopy, immersion, polarized light (⊗), 100x.



Fig. 35 - Actinolite prismatique dans une émeraude de Piteiras. Diascopie, 100x. Photo Gemtechlab.

Prismatic actinolite in an emerald from Piteiras. Diascopy, 100x.



Fig. 36 Extrémité du cristal d'actinolite montrant des reliefs tétraédriques formés de faces {011} et {110}. Diascopie, lumière polarisée (⊗), 400x. Photo Gemtechlab.

Termination of the actinolite crystal, showing tetrahedral reliefs formed by {011} and {110} faces. Diascopy, polarized light (⊗), 400x.

sures d'émeraude. Pour les échantillons que nous avons reçus, les bruts qui provenaient directement de l'exploitation sans passer par les lapidaires ne contenaient que de l'huile (absorptions à 2850 > 2870, 2929, 2953 cm⁻¹). Par contre, les échantillons taillés contenaient des résines synthétiques (absorptions à 2850 < 2872, 2927, 2965, 3038, 3056 cm⁻¹; Fig. 38).

Spectrométrie d'absorption UV-Visible

Le spectre en lumière polarisée obtenu est typique des émeraude riches en fer. On y retrouve les absorptions vers 375 et 389 nm liées au Fe³⁺ (typique de certaines héliodores) et la bande large centrée dans le proche infrarouge liée

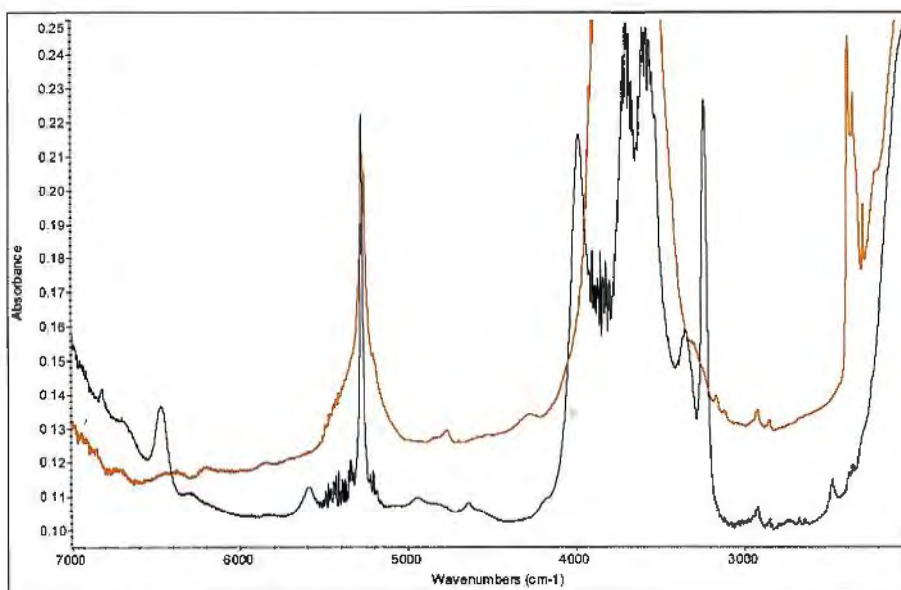


Fig. 37 - Spectre infrarouge polarisé d'une émeraude de Piteiras (faisceau $\perp$ "c"). En rouge : rayon extraordinaire ; en bleu : rayon ordinaire.

Piteiras emerald infra-red spectrum (beam $\perp$ "c"). Red: extraordinary ray, blue: ordinary ray.

au Fe^{2+} (typique des aigues-marines) qui explique l'augmentation de l'absorption vers l'infrarouge. Ceci s'ajoute bien sûr aux absorptions du chrome (Cr^{3+}) pratiquement pures, puisqu'il n'y a pas de vanadium (voir Fritsch *et al.*, 2002; Fig. 39).

Conclusion

Les émeraude de Piteiras sont des émeraude typiques du Quadrilátero Ferrífero, présentant des caractères géologiques, gemmologiques et isotopiques semblables à celles de Capoeirana ou Belmont, qui

l'entourent géographiquement. Elles se distinguent par un $\delta^{18}\text{O}$ compris entre 6,65 et 6,90 ‰ (moyenne $\delta^{18}\text{O} = 6,8 \pm 0,1\text{‰}$), la plus légère des valeurs mesurées dans les émeraude brésiliennes. L'étude des inclusions fluides et des isotopes de l'hydrogène pour l'eau des canaux démontre que la nature des fluides est strictement métamorphique, même si des granites sont au contact de la minéralisation.

Du point de vue gemmologique, rien ne les distingue fondamentalement des émeraude classiques. Ce sont des émeraude strictement chromifères et ferrifères, sans vanadium. Leur indice de réfraction se situe dans les valeurs relativement élevées de l'émeraude en raison de leur teneur en fer, chose habituelle pour les émeraude brésiliennes. Les inclusions qu'on y rencontre représentent l'éventail des inclusions typiquement représentées dans les émeraude des autres gisements brésiliens hormis quelques particularités énoncées plus haut (albite présente sous différentes morphologies ; séries longues et complexes de phases dans les canaux et témoins en phases uniquement liquides et gazeuses du système $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ dans la totalité des cavités).

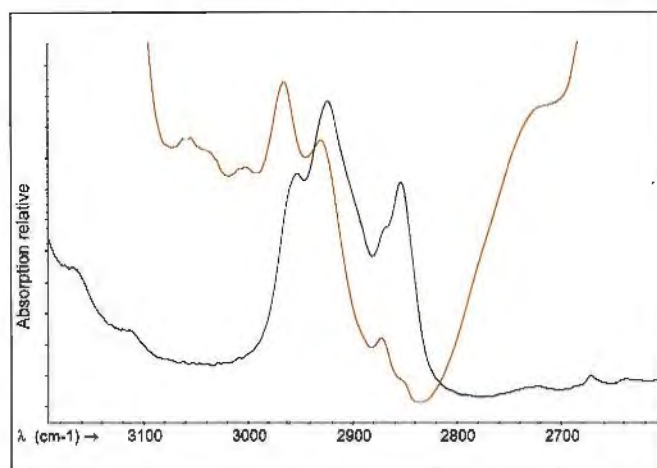


Fig. 38 - Spectre infrarouge d'un brut huilé (bleu) et d'une pierre taillée avec résine epoxy (rouge). Infrared spectrum of an oiled rough (blue) and of an epoxy filled faceted stone (red).

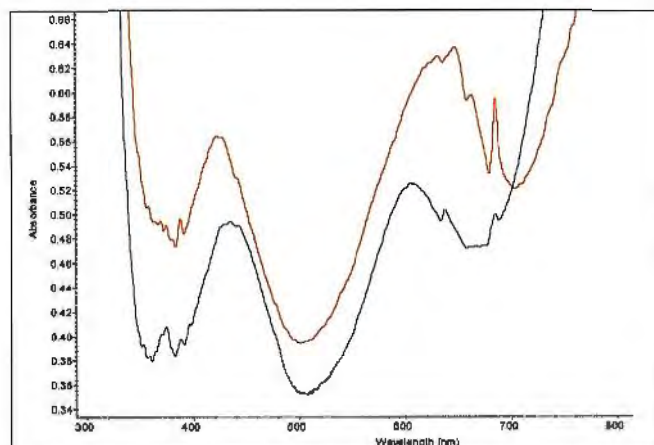


Fig. 39 - Spectre UV-VIS polarisé d'une émeraude de Piteiras (faisceau $\perp$ "c"). En rouge : rayon extraordinaire ; en bleu : rayon ordinaire.

Piteiras emerald UV-VIS spectrum (beam $\perp$ "c"). Red: extraordinary ray; blue: ordinary ray.

Références bibliographiques

- Alexandrov P., Giuliani G., Zimmermann J-L (2001). "Mineralogy, age and fluid geochemistry of the Rila Emerald deposit, (Bulgaria)". *Econ. Geol.*, 96, 1469-1476.
- Almeida F.E.M., Hasid Y., Brito Neves B.B., Fuck R.A. (1981). "Brazilian structural provinces: an introduction". *Earth Sci. Rev.*, 17, (1-2), 1-29.
- Bastos F.M. (1981). "Emeralds from Itabira, Minas Gerais, Brazil". *The Lapidary Journal*, 35, 9, 1842-1848.
- Bertrand J.M., Jardim de Sá E.F. (1990). "Where are the Eburnian-Transamazonian collisional belts?". *Can. J. Earth Sci.*, 27, 1382-1393.
- Bruto Neves B.B., Cortez U.G. (1991). "Tectonic evolution of South America during the late Proterozoic". *Precambrian Res.*, 53, 23-40.
- Cunha O.L. (1961). "Esmeralda da Fazenda do Sossego, Santana dos Ferros, Minas Gerais, Brasil". *Gemologia*, Ano VII, 9-14.
- Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. (1993 reprint). *An Introduction to the Rock Forming Minerals*, 2nd edition, Longman Sci.&Tech., Harlow, Essex, England, 696 p.
- Epstein D.E. (1989). "The Capoeirana emerald deposit near Nova Era, Minas Gerais, Brazil". *Gems and Gemology*, 25, 3, 150-158.
- Fritsch E., Rondeau B., Notari F., Michelou J.-C., Devouard B., Peucat J.-J., Chalain J.-P., Lutzac Y., Arboleda C., de Narvaez D. (2002). "Les nouvelles mines de la Pita (Colombie) : 2ème partie". *Revue de Gemmologie A.F.G.*, 144, 13-21.
- Giuliani G. (1997). "Genèse des gisements d'émeraude du Brésil et de Colombie". Thèse d'Habilitation, INPL, Nancy, 147 p.
- Giuliani G., Cheilletz A., Zimmermann J-L., Ribeiro-Alhoff A.M., France-Lanord C., Féraud G. (1997a). "Les gisements d'émeraude du Brésil: genèse et typologie". *Chronique de la Recherche Minière*, 526, 17-61.
- Giuliani G., France-Lanord C., Zimmermann J-L., Cheilletz A., Arboleda C., Charoy B., Coget P., Fontan F., Giard D. (1997b). "Composition of fluids, dD of channel H₂O and d18O of lattice oxygen in beryls: genetic implications for Brazilian, Colombian and Afghanistan emerald deposits". *Intern. Geol. Review*, 39, 400-424.
- Giuliani G., France-Lanord C., Coget P., Schwarz D., Notari (Notari) F., Cheilletz A., Chaussidon M., Giard D., Piat D., Barriand P. (1998). "Vers une carte d'identité isotopique 18O/16O des émeraudes naturelles et synthétiques". In : Giard D., Giuliani G., Cheilletz A., Fritsch E., Gonthier E., ed., *L'émeraude. Connaissances actuelles et perspectives*, 55-70.
- Giuliani G., Chaussidon M., Schubnel H.J., Piat D.H., Rollion-Bard C., France-Lanord Ch., Giard D., Narvaez D., Rondeau B. (2000). "Oxygen isotopes and emerald trade routes since the antiquity". *Science*, v. 287, n°5453, 631-633.
- Giuliani G., Chaussidon M., France-Lanord Ch., Savary-Guerraz H., Chiappero P.J., Schubnel H.J., Gavrilenko E., Schwarz D. (2001). "L'exploitation des mines d'émeraude d'Autriche et de la Haute Egypte à l'Époque Gallo-romaine : mythe ou réalité?". *Revue de Gemmologie A.F.G.*, N°143, 20-24.
- Groat L.A., Marshall D.D., Giuliani G., Murphy D.C., Pierrey S.J., Jambor J.L., Mortensen J.K., Ercit T.S., Gault R.A., Mathey D.P., Schwarz D., Maluski H., Wise M.A., Wengzynowski W., Eaton W.D. (2002). "Mineralogical and geochemical study of the Regal Ridge showing emeralds, southeastern Yukon". *Canadian Mineralogist*, 40, 1313-1338.
- Häimi H.A., Schwarz D., Fischer M. (1987). "The emeralds of the Belmont mine, Minas Gerais, Brazil". *Journal of Gemmology*, 20, N°7-8, 446-456.
- Juda H.A.V., Schorscher H.D., Dardenne M.A., Schobbenhaus C., Haralyi N.E., Branco P.C.A., Ramalho R. (1984). "O cráton do São Francisco e a faixa de dobramento Araçuaí". In : *Geologia do Brasil. DNPM/MME, Brasília, Brazil*, 193-248.
- Just E. (1926). "Emeralds at Bom Jesus dos Meiras, Bahia". *Econ. Geol.*, 21, 808-810.
- Kanis J., Cox R., Lopez J.M., Nogueira Magalhães R. (2001). "La géologie et l'exploitation de l'émeraude à Piteiras". Rapport non publié (propriété Coqueiro et JML).
- Kazmi Ali H., Sneyd L.W. (1989). *Emeralds of Pakistan*, Van Nostrand Reinhold, New York, Elite Publishers Limited, Karachi, Pakistan.
- Klein C., Hurlbut C.S.Jr. (1993). *Manual of Mineralogy*, 21st edition, John Wiley & Sons Inc, New York, USA, 681p.
- Kyzer T.K. (1986). "Stable isotope variations in the mantle". *Reviews in Mineralogy. Mineralogical Society of America*, 16, 141-164.
- Ledru P., Bouchot V. (1993). "Revue des minéralisations aurifères du craton précambrien de São Francisco (Brésil) et discussion sur leurs contrôles structuraux". *Chronique de la Recherche Minière*, 511, 5-20.
- Machado N., Noce C.M., Belo de Oliveira O.A., Ladeira E.A. (1989). "Evolução geológica do Quadrilátero no Arqueano e Proterozóico inferior com base em geocronologia U-Pb". In : *Anais do V Simpósio de Geologia de Minas Gerais, Brasília, SBG/MG*, 10, 1-5.
- MacKenzie W.S., Guilford C. (1992). *Atlas de pétrographie. Minéraux de roches observés en lame mince*, traduction de J.-P. Michel, Masson, Paris, France, 98p.
- Maestrali Roland, (1989). *Catalogue Raman des Gemmes*, D.U.G., Université de Nantes, Nantes, France.
- Marshall F., Alkanin F.F. (1989). "Proterozoic contraction/extension of the southern São Francisco region, Minas Gerais, Brazil". *Tectonics*, 8, 555-571.
- Ribeiro-Alhoff A.M., Cheilletz A., Giuliani G., Féraud G., Barbosa Camacho G., Zimmermann J-L. (1997). "Evidences of two periods (2 Ga and 650-500 Ma) of emerald formation in Brazil by K-Ar et 40Ar/39Ar dating". *Intern. Geol. Review*, 39, 924-937.
- Romano A.W., Bertrand J.M., Michard A., Zimmermann J-L. (1991). "Tectonique tangentielle et décrochements d'âge Protérozoïque inférieur (orogénèse transamazonienne, environ 2000 Ma) au Nord du "Quadrilatère ferrifère" (Minas Gerais, Brésil)". *C.R. Acad. Sci., Fr.*, 313, (H), 1195-1200.
- Schorscher H.D., Guimarães P.F. (1976). "Estratigrafia e tectônica do Supergrupo Minas e geologia do distrito ferrífero de Itabira". In: *XXIX Congresso Brasileiro de Geologia, Ouro Preto, SBG (ed.)*, Roteiro das Excursões, 75-86.
- Schorscher H.D., Leterrier J. (1980). "Metasomatic formation of granitic rocks: petrology and chemistry". In: *26th Intern. Geol. Congr., Paris, Abstracts*, 1, p. 87.
- Schorscher H.D., Santana F.C., Polonia J.C., Moreira J.M.P. (1982). "Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais state : Rio das Velhas Greenstone Belt and Proterozoic Rocks". In : *International Symposium on Archean and Early Proterozoic geologic evolution and metallogenesis, Salvador, Bahia, Brazil, Excursions Annexes*, 43 p.
- Schwarz D. (1987). *Esmeraldas - Inclusões em gemas*. Imprensa Universitária UFOP, Ouro Preto, 450 p.
- Schwarz D., Giuliani G., Grunmann G., Glas M. (2002). "The origin of emerald... a controversial topic". *Emeralds of the world. ExtraLapis English N°2 : The Legendary green beryl*. Editors : Giuliani G., Jamot M., Annandale V.A., Neumeier G., Ottaway T., Sinkankas J., Staebler G. Lapis International, LLC, Hampton USA, 18-23.
- Souza J.L. (1988). "Mineralogia e geologia da esmeralda da jazida de Itabira, Minas Gerais". *Revista Escola de Minas*, 43, 2, 31-50.
- Souza de J.L. (1990). "Mineralogia e geologia da esmeralda da jazida de Itabira, Minas Gerais". *Revista Escola de Minas*, 43, (2), 31-50.
- Souza de J.L., Mendes J.C., da Silveira Bello R.M., Svi-szero D.P., Valarelli J.V. (1992). "Petrographic and microthermometrical studies of emeralds in the "Garimpo" of Capoeirana, Nova Era, Minas Gerais State, Brazil". *Mineralium Deposita*, 27, 161-168.
- Stockton C.M. (1984). "The chemical distinction of natural from synthetic emeralds". *Gems & Gemology*, Vol. 20, No. 3, pp. 141-145.
- Sumagawa I. & Urino A. (1999). "Beryl crystals from pegmatites: morphology and mechanism of crystal growth". *Journal of Gemmology*, 26, 8, 521-533.
- Zecchini P., Maitrallet P. (1998). "Que peut apporter la spectrométrie infrarouge dans l'étude des émeraudes". *L'émeraude*, Association Française de Gemmologie, Paris, France, pp 81-96.