

RUBIS TRAPICHES DE MONG HSU, MYANMAR

Virginie Garnier¹, Daniel Ohnenstetter¹, Gaston Giuliani^{2,1}, Dietmar Schwarz³

1 : CRPG/CNRS, UPR 2300, BP 20, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy, France

2 : IRD, Département Milieux et Environnement, Paris, France

3 : Gübelin Gemmological Laboratory, 102 Mainhofstrasse, 6000 Lucerne 9, Suisse

Résumé

Le rubis et l'émeraude cristallisent parfois avec une texture particulière dénommée "trapiche", formée de six bras squelettiques et de six secteurs de croissance. Les gisements des rubis et émeraudes "trapiches" présentent des similitudes : la nature minéralogique des formations-hôtes des minéralisations et les interactions fluide-roche mises en jeu lors de la formation de ces gisements. Cette étude porte sur six échantillons de rubis "trapiches" provenant de Mong Hsu, Myanmar. Les parties squelettiques des rubis "trapiches" sont constituées d'inclusions solides de nature minéralogique très variée : carbonates, silicates, oxydes, fluorures et graphite. Les secteurs de croissance des rubis ont des compositions chimiques en éléments chromophores très hétérogènes. Les différents mécanismes de formation de la texture "trapiche" sont discutés.

Mots-clés : rubis "trapiche", Mong Hsu, Myanmar, croissance dendritique, microsonde électronique, cathodoluminescence.

Abstract

Ruby and emerald display sometimes a peculiar texture called "trapiche". In "trapiche crystals" six growth sectors of a monocrystal are separated from each other by six skeletal arms. "Trapiche" rubies and emeralds occur in deposits that show similar features. The mineralogy of the host rocks and the fluid-rock interactions involved in the formation of these special crystals are analogous. This paper is based on the examination of six "trapiche" rubies from Mong Hsu, Myanmar. The skeletal parts are characterized by the presence of a large amount of solid inclusions : carbonates, silicates, oxydes, REE-fluorides and graphite. The different growth sectors of a crystal show heterogeneous trace-element compositions. The formation mechanisms proposed in the literature for the "trapiche" texture are discussed.

Keywords : "trapiche" ruby, Mong Hsu, Myanmar, dendritic growth, microprobe, cathodoluminescence.

1 - Introduction

Le rubis et l'émeraude, qui cristallisent respectivement dans l'hémihédrie et l'holoédrie du système hexagonal, présentent des cristaux à morphologies particulières formés de six bras squelettiques et de six secteurs de croissance, appelés "trapiches". La terminologie "trapiche" a d'abord été utilisée pour certaines émeraudes de Colombie en raison de leur ressemblance avec le système de roues dentées servant à broyer la canne à sucre (McKague, 1964). Ces émeraudes ont été décrites pour la première fois par Bertrand (1879) à la société minéralogique de France. Ces cristaux hexagonaux comportent au centre une partie hexagonale presque incolore, entourée d'une portion verte striée parallèlement aux côtés de l'hexagone et présentant des modifications tangentes aux arêtes du prisme. L'arrangement textural en six secteurs leur confère un aspect étoilé. Ces cristaux ont la particularité de présenter une intercroissance de béryl et de matériel inclus ou interstitiel qui peut être de nature variée : des carbonates, de la pyrite, de l'apatite, de l'albite-oligoclase, du feldspath potassique, de la monazite et du zircon (Ohnenstetter et al., 1998), des schistes noirs¹ et du graphite (Scheibe, 1916, Nassau et Jackson, 1970, Villalba et Del Diestro, 1973). Pour la famille des corindons, la texture "trapiche" a été décrite dans les saphirs (Koivula et al., 1994), les corindons (Henn et Bank, 1996) et les rubis, notamment ceux de la région de Luc Yen, au Viêt-nam et à Mong Hsu, Myanmar (Müllenmeister et Zang, 1995; Schmetzer et al., 1996, 1998; Sunagawa et al., 1999). Ces cristaux particuliers n'ont jamais été décrits à l'affleurement, mais découverts dans les marchés locaux, à proximité des gisements.

Cette étude porte sur six échantillons de rubis "trapiche" provenant de la région de Mong Hsu (Figure 1), Myanmar (ex-Birmanie) et consiste en l'analyse de la texture de ces échantillons, de leur composition chimique et de la nature des inclusions qu'ils renferment. Une discussion, basée sur les résultats de cette étude comparés avec les données publiées par d'autres auteurs (Schmetzer et al., 1996, 1998; Sunagawa et al., 1999) tente

d'expliquer l'acquisition de la texture "trapiche" et les particularités chimiques observées dans ces rubis.



Figure 1 : Localisation géographique du gisement de rubis "trapiches" de Mong Hsu (Myanmar).

Location of the Mong Hsu (Myanmar) "trapiche" ruby deposit.

2 - Cadre géologique

En Colombie, les émeraudes "trapiches" ont été trouvées uniquement dans les gisements de Coscuez, Muzo et Peña Blanca situés dans la zone à émeraudes occidentale (Scheibe, 1916; Bernauer en Charlottenburg, 1933). Contrairement à la publication de Nassau et Jackson (1970), elles ne se rencontrent pas dans la zone à émeraudes orientale, dans les districts miniers de Gachalá et de Chivor. D'après Scheibe (1916), ces émeraudes "trapiches" ont cristallisé dans les schistes noirs de la formation de Viletta du Crétacé inférieur, et sont associées spatialement aux émeraudes gemmes qui cristallisent dans des veines à carbonates et pyrite.

Les gisements de rubis de Mong Hsu et de Luc Yen, où ont été décrits des rubis "trapiches", sont associés à des marbres et non au volcanisme basaltique néogène. Les rubis se

trouvent dans des séries sédimentaires d'âge paléozoïque métamorphisées, comprenant des alternances de grès, de schistes noirs et de calcaires avec des intercalations de roches mafiques, et recoupées parfois par des filons granitiques et/ou de pegmatites ; cependant, la liaison entre la formation de ces gisements et le magmatisme n'est pas évidente voire absente selon les cas. Les rubis se trouvent dans certains horizons de marbres. Ce cadre géologique est identique à ceux décrits pour les gisements de rubis de l'Asie du Sud-est associés à des marbres. Ils se situent au Tadjikistan, en Afghanistan, au Pakistan, en Azad-Kashmir, au Népal, au Myanmar, dans le Nord du Viêt-nam et le Sud de la Chine. La figure 2 présente une coupe type schématique des formations-hôtes des minéralisations à rubis de la région de Nangimali, Azad-Kashmir. Elles sont en tout point comparables aux formations-hôtes des gisements de rubis de Mong Hsu, Myanmar.

Ainsi, il apparaît que le cadre géologique de la formation des rubis "trapiches" d'Asie du Sud-est et des émeraudes "trapiches" de Colombie présente des similitudes : (1) les formations porteuses de la minéralisation

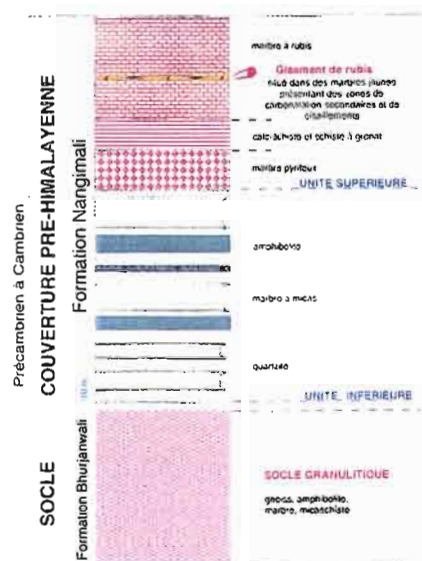


Figure 2 : Coupe schématique des formations-hôtes des gisements de rubis de Nangimali (Azad-Kashmir), modifiée d'après Malik (1994).

Schematic cross-section of Nangimali (Azad-Kashmir) ruby deposit, modified after Malik (1994).

sont constituées de roches carbonatées et de roches pélitiques ; cependant le degré de métamorphisme est tout à fait différent dans les deux cas : faciès amphibolite à granulite pour les gisements de rubis de l'Asie du Sud-est et faciès schistes verts pour les formations colombiennes. Ainsi, les conditions de température et de pression atteignent 600-620°C et 7 kbar à Hunza, Pakistan (Okrusch et al., 1976) ; tandis que les gisements d'émeraudes de Colombie résultent d'une interaction entre des fluides chauds et salés atteignant 300°C, sous une pression de 1 à 1,5 kbar, et des schistes noirs (Giuliani et al., 1996). Dans le cas de gisements de rubis, le métamorphisme peut être soit régional soit de contact, lié à l'intrusion de granites et/ou de pegmatites. Parfois, il est difficile de trancher entre ces deux types de métamorphisme ; dans certains cas, comme par exemple à Mogok, deux épisodes métamorphiques distincts, l'un régional et l'autre de contact, ont affecté successivement les formations à rubis (Kammerling et al., 1994), (2) la circulation des fluides minéralisateurs, quelle que soit leur nature, s'est faite dans des zones de décollement en Colombie et des zones de cisaillement dans le cas des gisements de rubis associés aux marbres, (3) les interactions fluide-roche ont permis la remobilisation des éléments nécessaires à la formation des gemmes, comme le béryllium pour les émeraudes de Colombie et l'aluminium, le chrome et le vanadium pour les rubis des marbres de l'Asie du Sud-est, (4) la nature de la composition minéralogique des veines à émeraudes et rubis : carbonates + pyrite ± graphite.

3 - Les rubis "trapiches"

3.1 - Techniques analytiques

L'analyse des inclusions solides a été réalisée soit par spectrométrie dispersive en énergie (Energy Dispersive Spectrometry, EDS) avec un microscope électronique à balayage (MEB) Hitachi S2500, soit par spectrométrie à dispersion de longueur d'onde (Wavelength Dispersive Spectrometry, WDS) avec une microsonde électronique Camebax SX50. La composition chimique élémentaire des

majeurs et des traces a été déterminée avec cette même sonde électronique. Les images de cathodoluminescence froide ont été obtenues sur un Technosyn monté sur un microscope optique, les spectres de cathodoluminescence ont été réalisés avec un MEB JEOL JSM 840 A (voir encadré A).

3.2 - Texture et minéralogie

L'étude des rubis "trapiches" a été réalisée sur des sections perpendiculaires à l'allongement de cristaux en forme de barillet. Leur texture est constituée de six secteurs triangulaires ou trapézoïdaux de croissance du rubis, rouges et transparents à translucides ; et de six bras squelettiques blancs à jaunes, opaques, partant soit d'un point central, soit d'un des six coins d'un cœur hexagonal central (Figures 3a, b, c et 4a, b, c et d). Cet hexagone central, lorsqu'il est présent, est généralement jaune et opaque, noir dans certains échantillons et rarement rouge et transparent (Schmetzer et al., 1996 ; Sunagawa et al., 1999).

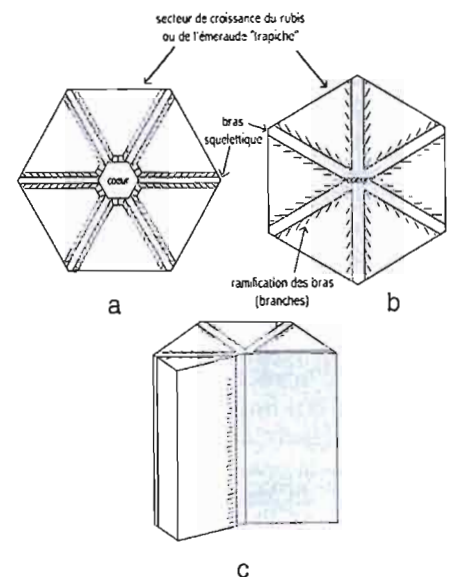


Figure 3 (a, b) : Sections perpendiculaires à l'axe c des cristaux "trapiches". La texture de la section (a) est plus commune dans les émeraudes, celle de la section (b) dans les rubis. (c) Section longitudinale d'un cristal "trapiche".

Section perpendicular to the c axis of "trapiche" crystals. The texture of the section (a) is more common in the emerald, (b) in the ruby. (c) Longitudinal section of a "trapiche" crystal.

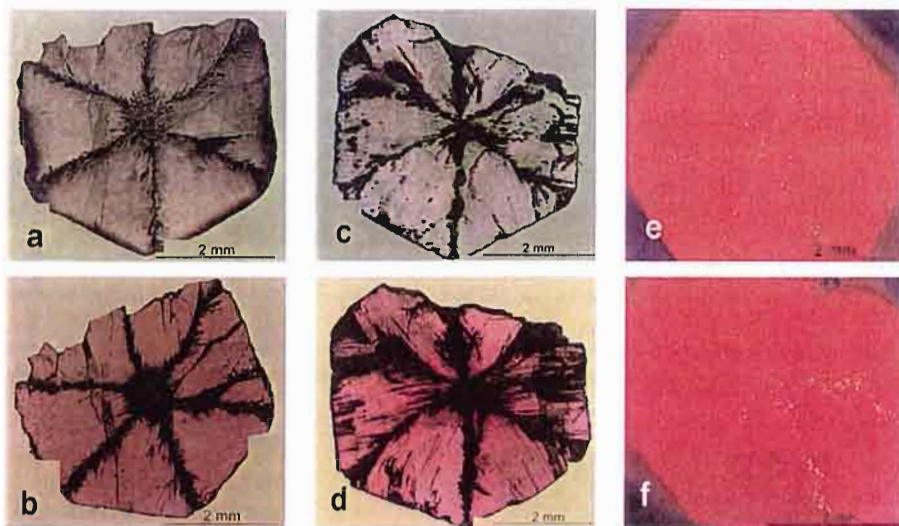


Figure 4 : Microphotographies en lumière transmise (b et d), en lumière réfléchie (a et c) et en cathodoluminescence (e et f) de rubis "trapiches". Echelle = 2 mm.

Transmitted (b and d) and reflected (a and c) light microphotographs and cold cathodoluminescence image (e and f) of "trapiche" rubies. Scale = 2 mm.

Sur les sections polies parallèles aux faces (0001), on remarque des structures en forme de tube prenant naissance au niveau des bras ou du cœur. Ces structures font un angle de 30° par rapport aux bras et sont perpendicu-

laire à la face basale des secteurs triangulaires ou trapézoïdaux. Elles renferment des inclusions solides et des fluides. Schmetzer et al. (1996) ont identifié de la calcite, de la dolomite et des silicates. Sunagawa et al.

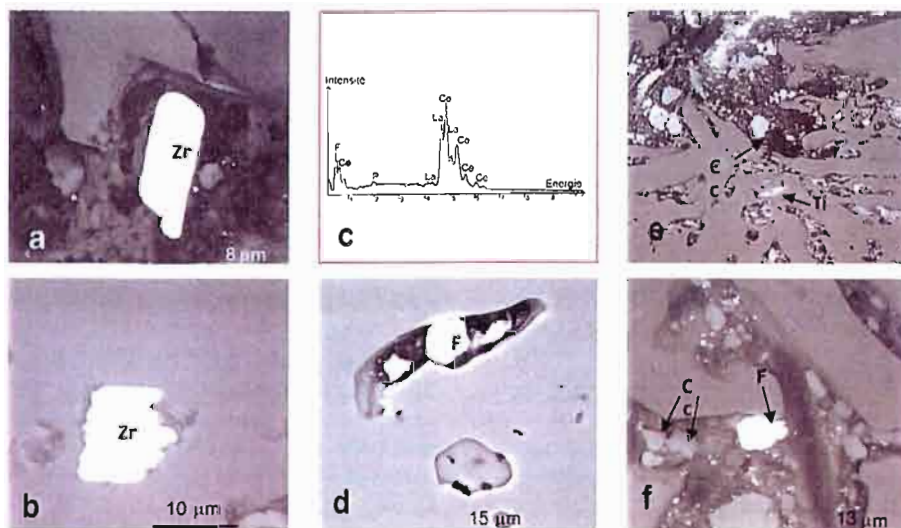


Figure 5 (a, b, d, e, f) : Microphotographies MEB en électrons rétrodiffusés de minéraux inclus dans les parties squelettiques des rubis "trapiches" ; Zr : zircon, Cc : calcite, F : fluorure de terres rares, Ti : titanite. (c) Spectre EDS d'une inclusion de bastnäsité.

Back-scattered electron images of minerals included in the skeletal parts of "trapiche" rubies ; Zr : zircon, Cc : calcite, F : REE-fluoride, Ti : titanite. (c) Spectra obtained by EDS of a bastnäsité inclusion.

(1999) ont mis en évidence la présence de grains de corindon, de calcite, de dolomite et des silicates dans ces structures tubulaires ainsi que des inclusions fluides monophasées et biphasées (liquide et gaz). Les carbonates analysés dans nos échantillons sont essentiellement de la calcite pure, de la calcite faiblement magnésienne (4 à 5% de MgO) et très rarement de la dolomite et de la sidérite. Outre ces carbonates, de nombreux minéraux sont présents en inclusion dans nos échantillons : chlorite, adulaire, sillimanite, rutile, sphène, graphite, barytine, pyrite, mica, amphibole, diaspore, oxydes de fer et bastnäsité (un fluorure de La et Ce) et zircon (Figure 5). Le tableau 1 récapitule l'ensemble des inclusions solides répertoriées d'une part dans les rubis de Mong Hsu et d'autre part dans les rubis "trapiches".

Les inclusions en forme de tube constituent les ramifications des bras squelettiques (Figure 6). Ainsi, il s'agit d'inclusions primaires contemporaines de la formation du cristal. Les cavités d'inclusions fluides monophasées et biphasées (vapeur et/ou liquide) sont disposées dans les mêmes plans que ceux des inclusions solides (Figure 6b). L'aspect rugueux et déchiqueté des limites des secteurs triangulaires ou trapézoïdaux de croissance de rubis est lié à leur présence. Dans les secteurs de croissance du rubis transparent, ces structures tubulaires se développent dans une région limitée autour des bras et du centre ; certaines recoupent les secteurs qui sont alors semi-transparents à translucides selon l'importance de ces structures.

3.3 - Composition chimique des secteurs de croissance du rubis

Les teneurs en chrome et vanadium, éléments chromophores fondamentaux du rubis, ainsi que les teneurs en titane, silicium et fer ont été mesurées à la microsonde électronique dans les secteurs de croissance du rubis. Pour chaque échantillon, un profil parallèle à un bras a été réalisé dans un des six secteurs de croissance du rubis. La symétrie de l'habitus des échantillons permet de supposer que la répartition des teneurs en ces éléments est la même pour les six secteurs d'un même échantillon. De plus, les observations au microscope électronique à balayage et en cathodolumi-

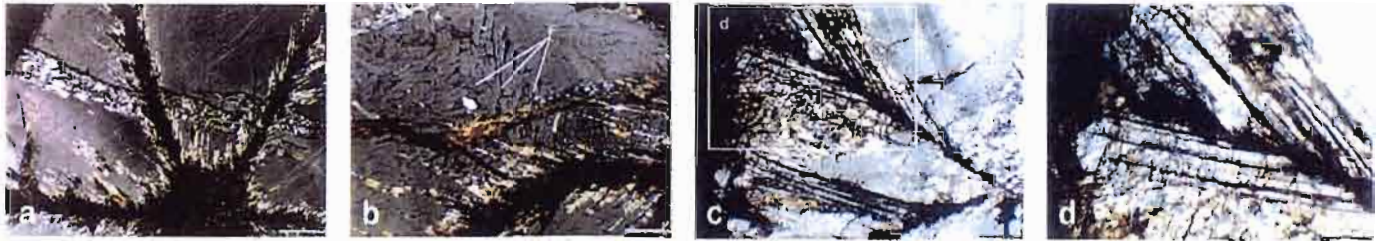


Figure 6 : Microphotographies en lumière transmise polarisée. (a) Détail des parties squelettiques d'un rubis "trapiche" (la barre correspond à 3,5 mm). (b) Inclusions fluides (IF) piégées dans un secteur de croissance du rubis (la barre correspond à 1,8 mm). (c) Terminaison d'un bras squelettique (la barre correspond à 3,5 mm). (d) Détail de la figure 6c montrant la ramification d'un bras squelettique (la barre correspond à 1,8 mm).

Transmitted polarized light photomicrographs. (a) Detail of the skeletal parts of a "trapiche" ruby (the scale corresponds to 3.5 mm). (b) Fluid inclusions trapped in a ruby growth sector (the scale corresponds to 1.8mm). (c) End of a skeletal arm (the scale corresponds to 3.5 mm). (d) Detail of the figure 6c showing the ramification of a skeletal arm (the scale corresponds to 1.8 mm).

nescence chaude ne mettent pas en évidence de zonation chimique d'un secteur à l'autre. D'un échantillon à l'autre, les teneurs en ces éléments sont variables. La teneur en chrome varie de 1500 à 17500 ppm, celle de vanadium est comprise entre 75 et 1800 ppm, la teneur en titane varie de 200 à 4000 ppm. Par contre, la teneur en silicium est inférieure à 200 ppm dans tous les échantillons, celle en fer est généralement inférieure à 100 ppm et presque toujours inférieures aux limites de détection de la microsonde électronique.

Au sein d'un même échantillon, les teneurs en fer et en silicium sont quasiment constantes. Par contre, les teneurs en chrome, titane et vanadium sont très variables. Dans cinq des six échantillons étudiés, la teneur en chrome est fortement décroissante depuis le cœur du rubis "trapiche" vers sa bordure (Figure 7) ; la teneur au cœur du rubis est environ deux fois celle de la bordure ; dans le sixième échantillon, la répartition des teneurs est inversée. Les teneurs en titane et vanadium sont également très variable au sein d'un même échantillon. Dans cinq échantillons, l'évolution de ces teneurs suit globalement celle du chrome, avec des teneurs deux à trois fois plus élevées au centre qu'au bord. Deux échantillons ont un cœur hexagonal, l'un est enrichi en chrome par rapport aux secteurs de rubis trapézoïdaux, l'autre est appauvri (il s'agit de l'échantillon présentant une répartition inverse de la teneur en chrome).

Selon Sunagawa et al. (1999), la répartition des éléments traces dans les différentes structures des rubis "trapiches" est liée à la fois à des paramètres thermodynamiques comme la différence de répartition entre les secteurs de

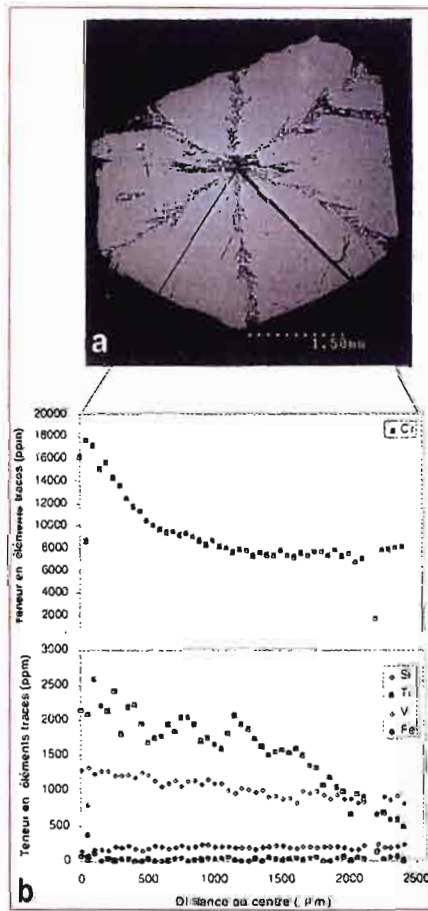


Figure 7 (a) : Photo MEB en électrons rétrodiffusés d'un rubis "trapiche". (b) Traversée dans un des secteurs. Les teneurs en chrome, vanadium, titane, fer et silicium sont exprimées en parties par million (ppm) dans Garnier et al. (soumis).
(a) : Back-scattered electron image of a "trapiche" ruby. (b) Microprobe scanning through a growth sector. The contents of chromium, vanadium, titanium, iron and silicium are given in part per million (ppm) in Garnier et al. (submitted).

croissance de rubis et les parties squelettiques et par des paramètres cinétiques comme la zonation du chrome dans les secteurs de rubis.

3.4 - Cathodoluminescence

Les zones de croissance des rubis délimitées par les bras squelettiques luminescent dans les rouges ; la couleur varie du rouge vermillon au rouge framboise selon les échantillons. Les bras squelettiques apparaissent quant à eux en jaune, du fait de la luminescence due aux ions Mn^{2+} présents dans les carbonates. Comme pour les émeraudes, le principal activateur de cathodoluminescence des rubis est l'ion Cr^{3+} ; ainsi, le rubis et l'émeraude (Ohnenstetter et al., 1998) apparaissent tous deux rouges en cathodoluminescence froide (Figure 4 e et f). Le spectre d'émission est complexe (Figure 8). Le pic majeur est localisé à 691,5 nm (Garnier et al., soumis).

L'intensité de l'émission de cathodoluminescence diminue avec l'augmentation de la teneur en éléments traces : vanadium, titane et chrome (Garnier et al., soumis).

3.5 - Mécanismes de formation de la texture "trapiche"

Plusieurs auteurs ont formulé des hypothèses sur la formation des textures "trapiches" ou sur les zonations en secteurs observées dans les porphyroblastes d'andalouite (variété chiasolite), les staurolites et les grenats.

Harker (1950), étudiant les textures des chiasolites, suggère que l'intersection des bras squelettiques correspond au nucléus du cristal de chiasolite, incapable à ce stade de la croissance de se libérer des inclusions solides.

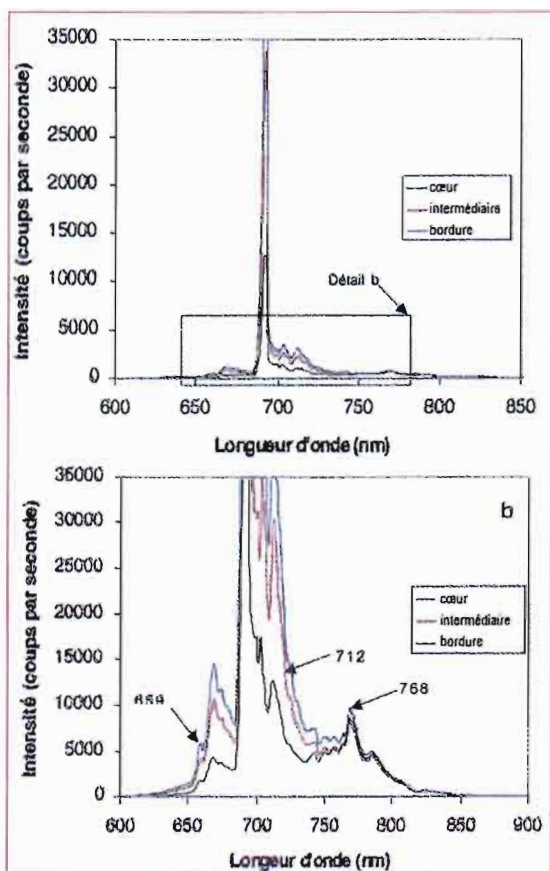


Figure 8 (a) Spectre de cathodoluminescence d'un rubis "trapiche" obtenu le long d'une traversée dans un secteur de croissance du rubis. **(b)** Détail des pics les plus importants dans Garnier et al (soumis).

Cathodoluminescence spectra of a "trapiche" ruby obtained through a ruby growth sector. **(b)** Detail of the spectra 8a in Garnier et al. (submitted).

Ensuite, au fur et à mesure du développement des faces cristallines, les matériaux étrangers ont été balayés et se sont accumulés aux limites des différentes faces cristallines.

Rast (1965) a proposé, pour les chiastolites, un

mécanisme de croissance rapide dendritique aux limites des secteurs des porphyroblastes dans une solution sursaturée (voir encadré B). Une diminution de la sursaturation provoque l'arrêt de la croissance dendritique aux coins du minéral et le développement des faces cristallines déjà existantes, remplissant les interstices entre les limites de secteurs. Cependant, si ce mécanisme était correct, il devrait être possible d'observer, au moins sur certains porphyroblastes, la présence de bras dendritiques plus longs que les faces qui se sont développées ultérieurement entre les dendrites. Or, de tels cristaux n'ont jamais été observés (Rice et Mitchell, 1991).

Pour Sunagawa et al. (1999), les bras et leurs ramifications se sont formés par croissance dendritique du corindon dans les conditions de l'eutectique⁴ du corindon et des inclusions présentes dans ces bras squelettiques (des carbonates et des silicates). La présence d'inclusions fluides suggère que la croissance dendritique s'est faite en milieu liquide. Le corindon, les silicates et les carbonates ont coprécipité à partir d'une phase fluide, lors de la croissance dendritique. Cette étape de croissance dendritique a dû se dérouler au tout début de la formation des rubis "trapiches" ou a pu être précédée par une phase de croissance ordinaire du rubis. Dans ce dernier cas, un cœur de rubis s'est d'abord formé, sur lequel a poussé le squelette dendritique. Cette texture est rarement obser-

vée dans les rubis "trapiches", elle est par contre courante dans les émeraudes "trapiches". A l'inverse, il est rare que les bras ne s'intersectent qu'en un point central dans le cas des émeraudes tandis que cette texture est couramment observée dans les rubis "trapiches". Sunagawa et al. (1999) ont supposé que la croissance dendritique nécessite des conditions où la force motrice de croissance cristalline, liée à la concentration des éléments de la solution dans laquelle le cristal se forme, à la température, à la vitesse de diffusion des éléments chimiques à la surface du cristal et à l'énergie de surface, est plus grande, et une interface solide-liquide plus rugueuse que dans le cas du développement des secteurs triangulaires ou trapézoïdaux de rubis entre les bras squelettiques. Pendant cette étape, les bras du squelette du cristal "trapiche" se sont développés jusqu'à atteindre leur taille finale. Ensuite, cette force motrice diminuant, les interfaces sont devenues plus lisses et les six secteurs de rubis se sont développés dans les interstices laissés entre les bras. Sunagawa (1987) discute les relations entre la force motrice et la vitesse de croissance des minéraux ainsi que les mécanismes de croissance cristalline mis en jeu aux interfaces rugueuses et lisses. De même, Yokoyama et Kuroda (1990) et Yokoyama (1993) mettent en évidence que plusieurs facteurs gouvernent la forme des cristaux de neige, dendritiques ou hexagonaux, notamment la sursaturation en eau dans le milieu de cristallisation du cristal de glace, la vitesse moyenne de déplacement des molécules d'eau, le coefficient de diffusion des molécules adsorbées à la surface du cristal vers les sites de croissance et la taille du cristal.

Nous préférons considérer que la croissance des secteurs de rubis et celle du squelette sont contemporaines et reliées à la surfusion⁵ du liquide. Lorsque la surfusion est importante, la croissance couche par couche devient instable et la croissance continue débute ; elle est plus importante au niveau des limites de face et des coins : la croissance y est dendritique (Smith et Brown, 1988). Les éléments non incorporés dans le réseau du rubis, comme par exemple le fluor, le calcium, le magnésium, le potassium, trop gros pour s'incorporer au réseau cristallin du rubis, sont expulsés vers les bras du squelette, comme l'avait suggéré Harker (1950).

Encadré A

A : Cathodoluminescence (de cathode et luminescence provenant du latin "lumen = lumière + escence" : qui émet de la lumière) - L'utilisation de la cathodoluminescence s'est répandue dans les années soixante pour l'étude et la caractérisation de matériaux géologiques. Elle correspond à la luminescence que présentent certains minéraux lorsqu'ils sont bombardés par un faisceau d'électrons. Deux principaux types d'appareils de cathodoluminescence existent actuellement. Le premier, appelé à cathode froide, est monté sur un microscope optique ; le second, dit à cathode chaude, est monté sur les microscopes à balayage ou sur les microsondes électroniques.

Encadré B

Quelques notions sur la croissance cristalline - Trois principaux processus contrôlent le taux de croissance cristalline : (1) la cinétique de diffusion et d'adsorption des molécules à la surface du cristal, (2) le transport des molécules dans le liquide, (3) le transfert de chaleur latente de cristallisation à la surface du cristal. Selon les taux relatifs de transfert de chaleur et de diffusion, le mécanisme de croissance et l'état de surfusion, c'est l'un ou l'autre de ces processus qui est le facteur dominant. Il y a deux principaux types de croissance cristalline, selon le mécanisme d'incorporation des atomes à la surface du cristal : la croissance continue et la croissance couche par couche. Dans la croissance continue, les atomes peuvent s'incorporer à n'importe quel endroit de la surface ; ce type de croissance est associé à des interfaces irrégulières ou rugueuses, de nombreuses liaisons atomiques restent vacantes et l'énergie de surface est élevée. Dans la croissance couche par couche, les atomes s'incorporent essentiellement aux couches limites, l'interface est donc plus lisse et régulière, il y a peu de liaisons atomiques vacantes et l'énergie de surface est plus faible (Dowty, 1980).

4 - Discussion

4.1 - Zonation chimique des rubis "trapiches"

Cette étude met en évidence que les rubis "trapiches" sont chimiquement hétérogènes. Schmetzer et al. (1998) l'avaient également mis en évidence par des études aux rayons X et par analyse à la microsonde électronique. Plusieurs effets se superposent dans les différents échantillons : (1) la zonation chimique en chrome, et selon les échantillons, en titane et en vanadium dans les secteurs triangulaires et trapézoïdaux et dans les cœurs hexagonaux des rubis "trapiches". Ces zonations ont déjà été observées par des cartographies de répartition des éléments (Schmetzer et al., 1998), (2) les teneurs en fer dans les secteurs de croissance du rubis sont très faibles, alors que les structures squelettiques renferment des oxydes de fer, (3) la nature des inclusions solides (carbonates, silicates, oxydes de fer, zircon et fluorures de terres rares notamment) piégées dans les bras squelettiques.

4.2 - Présence de fluorures de terres rares en inclusion dans le rubis "trapiches" de Mong Hsu

Peretti et al. (1996) ont étudié des cristaux de corindon de Mong Hsu à cœur de saphir entouré par une couronne de rubis. Le passage du saphir au rubis est lié à la répartition

des teneurs en chrome, vanadium et titane : chrome élevé et titane et vanadium faible dans le rubis, répartition inverse dans le saphir. Ces auteurs mettent en évidence que la composition chimique du fluide à partir duquel ces rubis ont cristallisé a varié au cours du temps. Les oscillations des teneurs en chrome et en titane observées dans les rubis de Mong Hsu résultent de la circulation de fluides métasomatiques⁹ riches en fluor. La présence de bastnäsité en inclusions dans nos échantillons démontrent que ces fluides étaient bien enrichis en fluor.

4.3 - Pourquoi le rubis et l'émeraude ont-ils la même couleur en cathodoluminescence froide et pas en lumière naturelle?

Les couleurs de ces deux minéraux sont liées à l'absorption d'énergie produite par un rayon lumineux qui provoque le passage d'un électron d'une orbitale atomique à une autre orbitale de plus grande énergie. Le changement d'énergie de cette transition est liée à l'énergie de la lumière absorbée. La couleur verte de l'émeraude et la couleur rouge du rubis sont liées à la présence d'ions Cr^{3+} qui se substituent à l'ion Al^{3+} dans leurs réseaux cristallins (Fritsch et Rossman, 1987, 1988a, 1988b ; Hughes, 1997 ; Charoy, 1998). Les spectres d'absorption du rubis et de l'émeraude sont caractérisés par deux bandes d'absorption larges dans le

visible avec la position des maxima différente. Pour le rubis, ils sont situés à un niveau de plus haute énergie et donc de longueur d'onde plus courte. Ils possèdent deux bandes, l'une centrée dans le bleu à 480 nm et l'autre dans le rouge avec une longueur d'onde vers 610 nm. L'œil étant plus sensible au rouge qu'au bleu, le rubis apparaît rouge (Fritsch et Rossman, 1999). De plus, le rubis émet une fluorescence rouge liée à l'électron excité revenant à son état d'énergie initial ; cette fluorescence renforce la couleur rouge du rubis. La bande de l'émeraude est centrée dans le vert à 560 nm, là où l'œil est le plus sensible. Les bandes liées aux ions V^{3+} renforcent celles des ions Cr^{3+} . La différence entre le rubis et l'émeraude peut s'expliquer par les particularités de l'environnement cristallographique de l'ion chrome. La distance entre l'ion chrome et ses voisins oxygène et les détails de la géométrie locale (distorsion des octaèdres constitutifs de l'émeraude) influent sur le champ électrostatique du chrome et expliquent que les spectres d'absorption bien que similaires présentent des maxima à des niveaux d'énergie différents.

Le principal activateur de cathodoluminescence du rubis et de l'émeraude est bien l'ion Cr^{3+} ; les transitions électroniques mises en jeu sont les mêmes. Ainsi, ces deux minéraux ont la même gamme de couleur en cathodoluminescence froide et le même type de spectre en cathodoluminescence chaude.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Mme Sandrine Barda, MM Frédéric Diot et Alain Kohler du Service Commun de microanalyse de l'Université H. Poincaré de Nancy, pour leur aide technique concernant les analyses à la sonde électronique et les photographies au microscope à balayage, ainsi que M. Philippe Blanc du Service Commun de microscopie électronique de l'Université Paris VI pour l'aide et l'obtention des images de cathodoluminescence au Technosyn et des spectres au microscope électronique à balayage.

Glossaire

1 : Schistes noirs - Roche sédimentaire argileuse ou marneuse à grains très fins, se débitant en feuillets et généralement riche en matière organique.

2 : Métamorphisme - Transformations d'une roche à l'état solide sous l'effet d'une élévation de température et/ou de pression, avec cristallisation de nouveaux minéraux, dits néoformés, et l'acquisition de textures et/ou de structures liées aux déformations.

3 : Éléments chromophores - Ce sont les éléments traces se substituant aux éléments majeurs d'un minéral et qui donnent leur couleur. Dans le cas du rubis, il s'agit essentiellement du chrome ; dans le cas du saphir, c'est le fer et le titane.

4 : Eutectique - C'est le point de fusion le plus bas d'un mélange. Cette température de fusion est inférieure à celle des constituants purs du mélange. Les proportions de chaque constituant dans le mélange sont telles que tout le mélange fond à la même température.

5 : Surfusion - Processus consistant à baisser la température d'une phase ou d'un assemblage de phases sous le point auquel un changement de phase devrait se réaliser à l'équilibre. Ce processus consiste à rendre le système métastable en diminuant la température.

6 : Métasomatose hydrothermale - Modification de la composition chimique des roches sous l'effet de circulations de fluides chauds (températures comprises entre 100 et 500°C).

	Rubis "trapiches" de Mong Hsu			Rubis de Mong Hsu		
	Schmetzer et al., 1996 ; 1998*	Sunagawa et al., 1999	Cette étude	Kammerling et al., 1994	Smith et Surdez, 1994	Peretti et al., 1995 ; 1996
Calcite	X	X	X	X	X	X
Dolomite	X	X	X	X		X
Silicates (K-Al-Fe±Ti)	X	X				
Chlorite			X			
Adulaire			X			
Sillimanite			X			
Rutile			X	X		X
Titanite			X			
Graphite			X			
Barytine			X			
Pyrite			X			
Mica			X	X		
Amphibole			X			
Zircon			X			
Hydroxyde d'alumine			X		X	X
Gaëthite			X			
Sidérite			X			
Bastnasite			X			
Fluorite						X
Spinnelle				X		
Apatite					X	X
Fuschite						X
Mg-Chlorite						X

Tableau 1 : Inclusions solides répertoriées dans les rubis de Mong Hsu et dans les rubis "trapiches" de Mong Hsu (Myanmar).

* correspond aux inclusions solides trouvées pour les rubis "trapiches" de Mong Hsu (Myanmar) et du Vietnam.

Solid inclusions found in rubies from Mong Hsu and "trapiche" rubies from Mong Hsu (Myanmar).

* correspond to solid inclusions found in "trapiche" rubies from Mong Hsu (Myanmar) and from Vietnam.

Références

- Bernauer en Charlottenburg F. (1933) - Las llamadas maclas múltiples de esmeralda de Muzo y sus anomalías ópticas. *Compilación de los estudios geológicos oficiales en Colombia, Ingeominas, Bogotá, 1933*, pp. 199-228.
- Bertrand E. (1879) - *Compte-rendu de la séance du 13 février 1879*. Bull. Soc. Minéral. France, pp. 2-31.
- Chatoy B. (1998) - Cristallochimie du béryl : L'état des connaissances. In : *L'émeraude*, Giardi D. ed., Co-édition AFG, CNRS et ORSTOM, pp. 47-54.
- Dowry E. (1980) - Crystal growth and nucleation theory and the numerical simulation of igneous crystallization. In : *Physics of magmatic processes*, Hargraves R.B. ed., pp. 419-485.
- Fritsch E. & Rossman G.R. (1987) - An update on color in gems. Part 1 : Introduction and colors caused by dispersed metal ions. *Gems and Gemology*, 23, pp. 126-139.
- Fritsch E. & Rossman G.R. (1988a) - An update on color in gems. Part 2 : Colors involving multiple atoms and color centers. *Gems and Gemology*, 24, pp. 3-15.
- Fritsch E. & Rossman G.R. (1988b) - An update on color in gems. Part 3 : Colors caused by band gaps and physical phenomena. *Gems and Gemology*, 24, pp. 81-102.
- Fritsch E. & Rossman G.R. (1999) - L'origine de la couleur dans les gemmes, première partie. *Revue de gemmologie*, 137, pp. 17-23.
- Garnier V., Olmstedter D., Giuliani G., Blanc Ph., Schwarz D. (soumis) - Activators and quenchers of cathodoluminescence in trapiche rubies from Mong Hsu (Myanmar). *Minéral. Petrol.*
- Giuliani G., Cheilletz A. & Raeda F. (1996) - La formation des gisements d'émeraude de Colombie. *ORSTOM Actualités*, 50, pp.17-24.
- Harker A. (1950) - *Metamorphic textures*. Methuen and Co ed., London, 362p.
- Henn U. & Bank H. (1996) - Trapichartige Korunde aus Myanmar. *Zeitsch. Deutschen Gemm. Gesell.*, 45, pp. 23-34.
- Hughes R.W. (1997) - *Ruby and sapphire*. RWH Publishing, Boulder, Colorado, 511p.
- Kammerling R.C., Scarran K., Bosshart G., Jobbins E.A., Kane R.E., Gibelin E.J. & Levinson A.A. (1994) - Myanmar and its gems - an update. *Journal of Gemmology*, 24, pp. 3-40.
- Koivula J.L., Kammerling R.C. & Fritsch E. (1994) - Gem news : "Trapiche" purple-pink sapphire. *Gems and Gemology*, 30, p. 197.
- Malik R.H. (1994) - *Geology and resource potential of Kashmir ruby deposits*. Report Azad-Kashmir Mineral and Industrial Development Corporation, 21p.
- McKague H.L. (1964) - Trapiche emeralds from Columbia. *Gems and Gemology*, 11, pp. 210-213 et 223.
- Müllermeister H.J. & Zang J. (1995) - En Trapiche-Rubi aus Myanmar (Burma). *Lapis*, 20, p. 50.
- Nassau K. & Jackson K.A. (1970) - Trapiche emeralds from Chivor and Muzo, Colombia. *Amer. Min.*, 55, pp. 416-422.
- Olmstedter D., Giuliani G. & Bustos O. (1998) - Emeraude trapiches colombiennes. In : *L'émeraude*, Giardi D. ed., Co-édition AFG, CNRS et ORSTOM, pp. 119-124.
- Okrusch M., Bunch T.E. & Bank H. (1976) - Paragenesis and petrogenesis of a corundum-bearing marble at Hunza (Kashmir). *Mineral. Deposita*, 11, pp. 278-297.
- Peretti A., Mullis J. & Mouawad F. (1996) - The role of fluorine in the formation of colour-zoning in rubies from Mong Hsu, Myanmar (Burma). *Journal of Gemmology*, 25, pp. 3-19.
- Peretti A., Schmetzer K., Bernhardt H.J. & Mouawad F. (1995) - Rubies from Mong Hsu. *Gems & Gemology*, 31, pp. 2-26.
- Rast N. (1965) - Nucleation and growth of metamorphic minerals. In : *Pitcher W.S. & Flinn G.W. eds. Controls of metamorphism*. Oliver & Boyd, Edinburgh, pp. 73-102.
- Rice A.H.N. & Mitchell J.I. (1991) - Porphyroblast textural sector-zoning and matrix displacement. *Min. Mag.*, 55, pp. 379-396.
- Scheibe R. (1916) - Informe geológico sobre las minas de esmeraldas de Muzo. *Compilación de los estudios geológicos oficiales en Colombia, Ingeominas, Bogotá, 1933, V.1*, pp. 169-198.
- Schmetzer K., Beili Z., Yun G., Bernhardt H.J. & Hänni H.A. (1998) - Element mapping of trapiche rubies. *Journal of Gemmology*, 26, pp. 289-301.
- Schmetzer K., Hänni H.A., Bernhardt H.J. & Schwarz D. (1996) - Trapiche rubies. *Gems & Gemology*, 32, pp. 242-250.
- Smith J.V. & Brown W.L. (1988) - Nucleation, growth, melting, dissolution, chemical zoning and morphology. In : *Feldspar mineral*. Springer-Verlag ed., pp. 418-518.
- Smith C.P. & Surdez N. (1994) - The Mong Hsu ruby : a new type of Burmese ruby. *Jewelsiam*, 5, pp. 82-98.
- Sugawara I. (1987) - Morphology of crystals. *Sugawara I. eds, Part B, Terra Science Publisher, Tokyo/Reidel, Dordrecht*, p. 509.
- Sugawara I., Bernhardt H.J. & Schmetzer K. (1999) - Texture formation and element partitioning in trapiche ruby. *Journal of Crystal Growth*, 206, pp. 322-330.
- Villalba A.M.B. & Del Diestro A.M.B. (1973) - La esmeralda de Colombia - Descripción y propiedades. Ponce de Leon Hermanos LTDA (Ed), Bogotá, 100p.
- Yokoyama E. (1993) - Formation of patterns during growth of snow crystals. *J. of Crystal Growth*, 128, pp. 251-257.
- Yokoyama E. & Kurada T. (1990) - Pattern formation in growth of snow crystals occurring in the surface kinetic process and the diffusion process. *Physical Review A*, 41, pp. 2038-2049.

J-F. SIRAKIAN

S.A.R.L.

7, rue de Châteaudun

75009 PARIS

TROIDIAS
TRICORNES
CŒURS
BRILLANTS
TOUTES GROSSEURS
ET FANTAISIES
TOUTES FORMES

Taillerie
de
diamants



Choix sur pièces :

- Ajustage sur œuvre
 - Appairages
 - Lignes
 - RETAILLE
- des pierres anciennes

TÉL. : 01 40 16 50 34

FAX : 01 40 16 40 67

Garnier V., Ohnenstetter D., Giuliani Gaston, Schwarz D.
(2002)

Rubis trapiches de Mong Hsu, Myanmar

Revue de Gemmologie, (144), 5-12

ISSN 0398-9011