Les Rubis de Vatomandry - Madagascar

Jean-Marie ARLABOSSE[1], Aurélien DELAUNAY[2], Nicolas LENNE[3]

Résumé

Un lot de seize rubis, issus du gisement secondaire d'Amboditavolo, au nord de la ville côtière de Vatomandry, dans la partie Est de Madagascar, est étudié ici. Des commentaires sur le gisement et le mode d'extraction sont apportés. Les données gemmologiques incluant la description des inclusions sont également décrites.

Abstract

A batch of sixteen rubies, coming from the secondary deposit of Amboditavolo, at the north of the Vatomandry town eastern coast of Madagascar, is studied here. The main features of the placer deposit and type of prospecting is illustrated. The gemmological data including the nature of the solid inclusions of these rubies are reported as well.

Mots-clés : Rubis, Madagascar, Vatomandry.

Introduction

La réputation de Madagascar n'est plus à faire en termes de quantité et de qualité de corindons (rubis, saphirs) qui y sont extraits (Giuliani *et al.*, 2007 ; Rakotosamizanany *et al.*, 2009a, b).

L'Est de la grande île est une des zones où de nombreux gisements secondaires furent découverts. La zone de Vatomandry est déjà connue pour avoir fourni principalement des rubis mais aussi des corindons de toutes les couleurs. Lacroix mentionnait déjà la présence de rubis en 1922 dans cette région (Lacroix, 1922). Vatomandry a ensuite produit des rubis gemmes en petite quantité dans les années 1980 puis plus récemment dans les années 2000 (Schwarz et Schmetzer, 2001 ; Giuliani *et al.*, 2007). Assez récemment l'un des auteurs (NL) a mis en exploitation un gisement de type secondaire sur sa propriété à 20 kilomètres au nord de cette ville côtière. Des rubis, saphirs et saphirs de couleurs ainsi que des zircons et grenats peuvent être trouvés dans un environnement sédimentaire de type placer (vieux lit de rivière).

Nous avons pu étudier un échantillonnage représentatif de rubis directement extraits de ce placer. Des illustrations de l'exploitation et des rubis alluvionnaires ainsi que l'étude des propriétés gemmologiques sont présentés afin de caractériser le gisement et de pouvoir le comparer avec d'autres gisements mondiaux de rubis gemmes.

Matériel étudié et méthodes analytiques

Une sélection de 16 pierres taillées entre 0.2 et 3.0 ct (Figure 1), toutes issues du gisement d'Amboditavolo a été étudiée par différentes méthodes :

Figure 1 - Vue sous une lumière type « halogène de bureau » des 16 pierres étudiées et représentatives des rubis extraits de l'exploitation.

- La spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (eng. FTIR) a été réalisée avec un spectromètre Alpha Bruker ayant un détecteur DLaTGS à faible bruit, équipé de son module de capture de signal en réflectance diffuse et opérant à une résolution fixée à 4 cm^{-1}. La spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier permet d'analyser les vibrations moléculaires dans un but d'identification de matière (notamment inclusions).

- La spectrométrie de fluorescence X en dispersion d'énergie (eng. EDXRF) permettant l'analyse chimique a été utilisée pour un usage qualitatif dans un premier temps, avec un spectromètre maison utilisant une tube à rayons X avec une anode en argent sous 25 kV et 15 µA et un détecteur CCD au silicium, capable de détecter les éléments du potassium (K) à l'uranium (U). Dans un second temps, un spectromètre EDXRF NexCG de la marque Rigaku, a été utilisé afin de pouvoir détecter et d'analyser semi-quantitativement des d'éléments en plus faibles concentrations. Ce spectromètre possède un tube à rayon X d'une puissance de 50W et une anode en palladium. Le détecteur est un détecteur SDD à haute sensibilité. Les éléments détectés sont nombreux du magnésium (Mg) à l'uranium (U).

- La spectrométrie (polarisée) dans le visible-proche infrarouge (eng. Vis-NIR) a été réalisée via un spectromètre OceanOptic USB4000 de résolution 1 nm, équipé d'un montage de capture du signal maison impliquant une sphère d'intégration. Ce type de spectromètre n'allant pas dans le domaine UV (et montrant un artefact connu de baisse du signal dans la zone de 400 à 430 nm), la spectrométrie d'absorption a également été réalisée (non polarisée) avec un spectromètre UV-Vis-PIR

Figure 2 - La zone de Vatomandry se situe sur la côte est de Madagascar. Le gisement de rubis d'Amboditavolo se situe à 20 km au nord de cette ville.

Figure 4 - Vue du gisement montrant différents puits de fouille. Au loin, une équipe de mineurs extrait les sédiments tout en maintenant le pompage.

Figure 3 - Mineurs creusant un lit ancien de la rivière jusqu'à atteindre la couche de gravier gemmifère. L'eau de la nappe phréatique est pompée et renvoyée vers la rivière située à proximité.

[1] *Président du Laboratoire de gemmologie Gem Solid-Phase (GSP), France, Nice-Paca.*

[2] *Responsable de laboratoire au Laboratoire Français de Gemmologie (LFG), France, Paris-Ile-de-France.*

[3] *Propriétaire de concession minière en rubis et saphirs - Madagascar - Vatomandry.*

Jasco V-670 de résolution 1 nm, avec une sphère d'intégration. L'analyse en spectrométrie visible est principalement utilisée pour la caractérisation des éléments chromophores d'une gemme.

- Les fluorescences aux ultraviolets onde courtes (UVC) ou ondes longues (UVL) ont été observées dans une boite noire standardisée éclairée par des tubes de 6W.

Le gisement de corindons gemmes d'Amboditavolo : méthodes d'exploitation et production

Situé à 20 km au nord de la ville de Vatomandry, le gisement secondaire d'Amboditavolo, de type placer en environnement basaltique (Rakotosamizanany *et al.*, 2009a) est directement exploité par les propriétaires avant une remédiation environnementale (Figure 2). L'extraction des gemmes se fait par des méthodes artisanales et non invasives pour l'environnement. Ceci permet ensuite une rapide réhabilitation du terrain pour la culture et le reboisement. En effet, suite à l'exploitation d'une zone, elle est replantée avec des hévéas, des poivriers ou des girofliers.

L'extraction de la couche gemmifère, se trouvant ici à une assez faible profondeur, entre 1,5 et 2 mètres, est réalisée manuellement avec des pelles, des pioches et des seaux (Figures 3 à 7). La terre, le sable et les graviers contenant les gemmes sont lavés et tamisés pour réaliser le calibrage des pierres (Figure 8). Le tri des bruts intéressants se fait ensuite visuellement. Les lots sont ensuite séparés par couleur et dimensions. La dimension des cristaux extraits varient de 5 mm à 1 cm et leur forme émoussée témoigne du transport des paléoplacers jusqu'aux placers actuellement exploités (Rakotosamizanany *et al.*, 2009a, b ; Figure 8).

Etude gemmologique

Paramètres physiques

La couleur générale des pierres est un rouge-pourpre profond à la lumière du jour et d'un rouge intense sous une lumière artificielle type « halogène de bureau » (cf. Figure 1). Un échantillon, possédant une large fracture remplie

Figure 5 - Vue d'une zone productive creusée en restanques et bassins jusqu'au niveau de la couche de graviers gemmifères. L'un des auteurs (NL) est ici entouré des mineurs et prospecteurs travaillant sur sa concession.

Figure 6 - Dépose des sédiments stériles extraits de l'exploitation et qui serviront à la plantation future d'hévéas, de poivriers ou de girofliers.

Figure 7 - Nettoyage et tamisage des graviers gemmifères extraits de l'ancien lit de la rivière et d'où est pompée l'eau utilisée pour le lavage des sédiments à corindons.

Figure 8 - Tri manuel réalisé par un des auteurs (NL, a) et aperçu de la production avec notamment un lot trié de saphirs de couleur (b), de rubis (c), et une vue d'un lot de rubis rétroéclairés (d). La taille des cristaux varie de 5 mm à 1 cm.

d'une substance orange (probablement limonite ou autre oxyde de fer), montre une couleur rouge orangé (pierre la plus à droite de la ligne des pierres ovales).

Sous rayonnement ultraviolet court (UVC, 254 nm), les pierres sont inertes à cause du fer présent dans la structure cristalline. Sous rayonnement ultraviolet long (UVL, 365 nm), une fluorescence rouge moyenne due au chrome reste cependant visible.

Les indices de réfraction sont typiquement ceux du corindon avec nω= 1.760, nω=1.769, cristaux uniaxe négatif. La biréfringence est de 0.009. L'indice ordinaire nω est porteur de la composante pourpre du dichroïsme et l'indice extraordinaire nω porte la composante orange-rosé. Ces deux composantes du dichroïsme donnent la couleur rouge-pourpre d'ensemble. Le spectre obtenu au spectroscope (Figure 9) est typique du rubis (corindon chromifère naturel ou synthétique).

Les inclusions des rubis d'Amboditavolo

Les inclusions solides en général sont importantes pour identifier leur origine géologique, leur traitement et leur provenance. Les inclusions des rubis de la zone de Vatomandry sont nombreuses, variées et documentées (voir par exemple Schwarz et Schmetzer, 2001 ; Rakotosamizanany *et al.*, 2009a, b). Les inclusions des rubis du lot étudié sont comparables à celles décrites dans la littérature. Leur identification au spectromètre Raman n'a pu être permise à cause du faible temps mis à notre disposition pour réaliser cette étude. Cependant, la comparaison avec les publications scientifiques réalisées sur ce sujet (Schwarz et Schmetzer, 2001 ; Gübelin et Koivula, 2004, 2009 ; Pardieu, 2012 ; etc.) ainsi que la présente étude a mis en évidence les caractéristiques suivantes pour les rubis du gisement d'Amboditavolo.

Les inclusions cristallines

La plupart des rubis étudiés contiennent des aiguilles de rutile orientées à 120°. Ces aiguilles sont courtes à moyennement longues

(de 200 à 1000 microns), parfois fines, parfois en « pointes de flèches » ou en lamelles montrant des irisations caractéristiques (figures 10a à 10c). Ces soies peuvent être confondues avec celles retrouvées dans les rubis de Mogok (Myanmar) (Gübelin et Koivula, 2004).

Le rutile peut aussi se retrouver sous la forme de cristaux noirs ou opaques, subarrondis (Figure 11a) ou prismatiques avec un éclat métallique (Figure 11b). Certains cristaux plus petits, possèdent une couleur rouge brune caractéristique (Figure 11c).

Des cristaux prismatiques d'apatite ont aussi été observés dans ces rubis (Figure 12a) lesquels sont souvent entourés d'un cerne d'éclatement visible avec une lumière incidente (Figure 12b). Cette figure de tension peut s'expliquer par la présence d'éléments radioactifs dans les inclusions d'apatite.

De nombreuses inclusions de zircon automorphes avec un habitus quadratique sont visibles dans ces pierres (Figures 13a et 13b). Ces inclusions sont isolées, réparties dans la masse ou en grappes (faisant penser à de la mie de pain). La présence de zircon demeure une caractéristique principale des corindons provenant d'environnements basaltiques à Madagascar (même si ce type d'inclusion a déjà été identifié dans des corindons provenant d'autres sources, voir par exemple Hugues, 2017).

Des inclusions lamellaires semblables aux inclusions de micas déjà décrites (Gübelin et Koivula, 2009 ; Hugues, 2017) ont aussi été observées dans les rubis étudiés (Figure 14).

Enfin, il est à signaler une occurrence de petits cristaux en atolls irisés à formes géométriques (Figure 15). Ce type d'inclusion est décrit d'habitude dans les rubis de Thaïlande (voir par exemple Hugues, 2017). Ce type d'inclusion ayant été observé que dans une pierre, il reste une inclusion rare dans ces rubis et l'idée d'une pollution par un rubis provenant d'un autre gisement n'est pas à écarter.

Autres caractéristiques des rubis

Des plans de macles sont visibles dans les rubis étudiés (plus particulièrement lorsqu'ils sont observés entre filtres polarisants croisés, Figure 16).

Aux intersections de ces plans de macle, des aiguilles peuvent former une structure semblable à un « échafaudage » (Figure 17).

Il se peut que ces lignes, se croisant en étoile à quasiment 90°, soient des canaux de Rose (Schoor *et al.*, 2016) plus ou moins remplis de boehmite, ou d'un autre minéral ayant rempli épigénétiquement ces canaux (Fristch et al., 2018). L'identification de ces matériaux de remplissage est envisageable en spectrométrie infrarouge (cf. paragraphe 4.5). Ces inclusions sont semblables à celles trouvées dans les rubis provenant notamment de Thaïlande ou des régions d'Afrique de l'Est.

Figure 9 - Spectre type des rubis d'Amboditavolo, vu au travers d'un spectroscope à réseau diffractant.

Des fissures tardives remplies de matières plus ou moins oxydées type limonite ainsi que de la kaolinite sont parfois présentes et peuvent apporter une sous-teinte orange à toute la pierre (Figure 18). L'identification de ces matériaux de remplissage a été réalisée en spectrométrie infrarouge (cf. paragraphe 4.5). La présence de ces minéraux secondaires peut indiquer les modifications minéralogiques ayant conduit à la formation de ces rubis. Les minéraux secondaires peuvent aussi être des produits de l'altération des sols lors du transport des rubis jusqu'aux placers.

Les rubis étudiés montrent sporadiquement des petits givres de guérison marqués par la présence de fluides, en « aile d'insecte ».

Il est à noter aussi qu'aucune zone de croissance contrastée et ondoyante comme celles trouvées régulièrement dans les rubis de Myanmar n'a pu être observée dans les rubis de Vatomandry. Cette caractéristique permet de différencier les rubis de ces deux origines qui peuvent être confondus sur la simple observation de leurs soies.

Spectrométrie UV-Vis-NIR

La spectrométrie d'absorption dans le visible (et le début du proche infrarouge) de ces rubis présente un spectre typique de corindon chromifère (Figure 19). Les différentes absorptions sont une bande dans le bleu (son déplacement n'est pas indiqué car le spectromètre utilisé montre un artefact dans cette zone), deux pics à 468 et 476 nm (lignes B), une large bande vers 550-550 nm, un faible pic vers 659 nm et un système de lignes d'émission vers 694 nm pour la majeure (en fait un fin doublet : Lignes R), 707 et 714 nm pour les mineures (satellites, ligne N etc.).

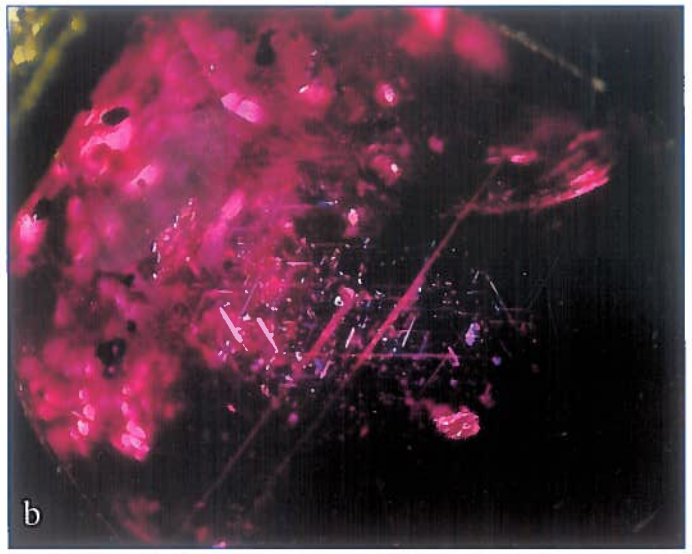
En spectrométrie avec lumière polarisée, les absorptions données par les deux couleurs du pléochroïsme sont assez proches : une bande vers 550 nm dans le rayon extraordinaire et une plus intense décalée vers 555 nm dans le rayon ordinaire.

La spectrométrie dans le domaine ultraviolet à visible permet de convenablement déterminer la position de la première bande du chrome vers 410 nm et témoigne, de par la position du « cut-off » (augmentation brutale de l'absorption), d'une importante quantité de fer (Figure 20).

La composition chimique des rubis

La composition chimique des gemmes a été analysée en spectrométrie de fluorescence X. Cet appareil ne permet pas de faire une étude chimique aussi précise qu'avec une microsonde électronique ou un spectromètre de masse couplé à un système par ablation laser car la zone analysée est de 2 mm (les inclusions pouvant awussi interférer sur le résultat). Cependant, les concentrations en éléments majeurs et traces ont pu être analysées et comparées à celles de rubis provenant d'autres régions et de contextes géologiques différents que nous retrouvons le plus souvent dans les laboratoires de gemmologie (Myanmar, Thaïlande, Mozambique ; Table 1). Les analyses chimiques ont été effectuées sur tous les rubis du lot (16 pierres). Les concentrations des rubis provenant des autres gisements font partie de la banque de données du LFG où au moins 20 échantillons de chaque gisement ont été testés.

L'analyse chimique a permis de montrer que la concentration en chrome présent dans ces rubis de Vatomandry est semblable à



Figures 10a, 10b - De fines aiguilles de rutile orientées à 120° sont visibles dans la grande majorité des pierres. Ces aiguilles peuvent être plus ou moins fines dans la masse (10a) et peuvent parfois montrer des faciès aplatis et miroitant (10b) (champ de vue 9a ~2 mm, 10b ~6 mm - Photos J.-M. Arlabosse, GSP).

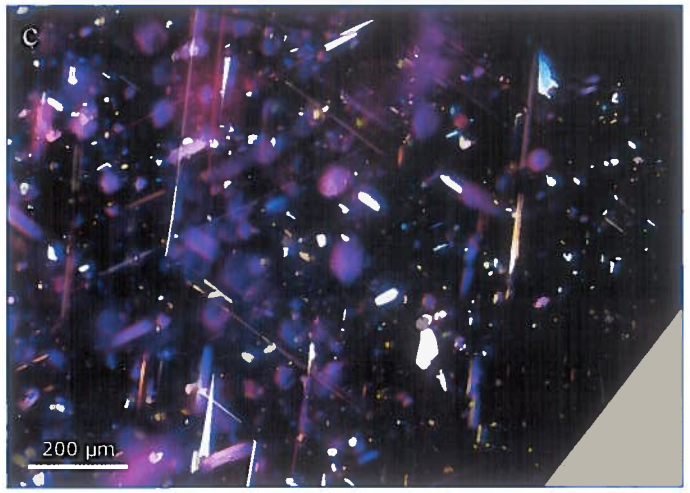
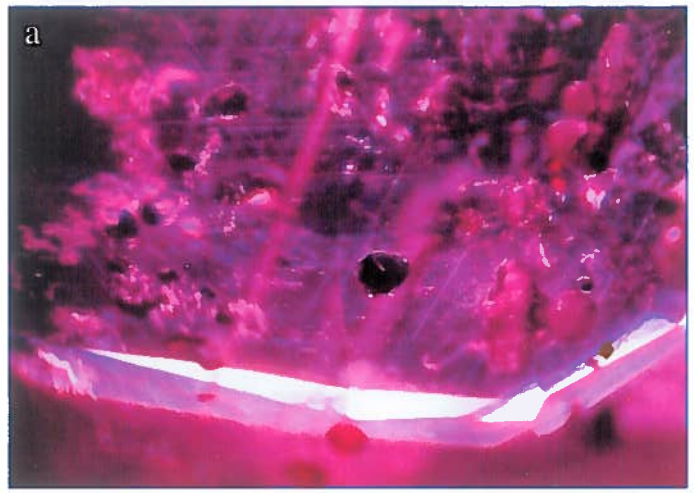
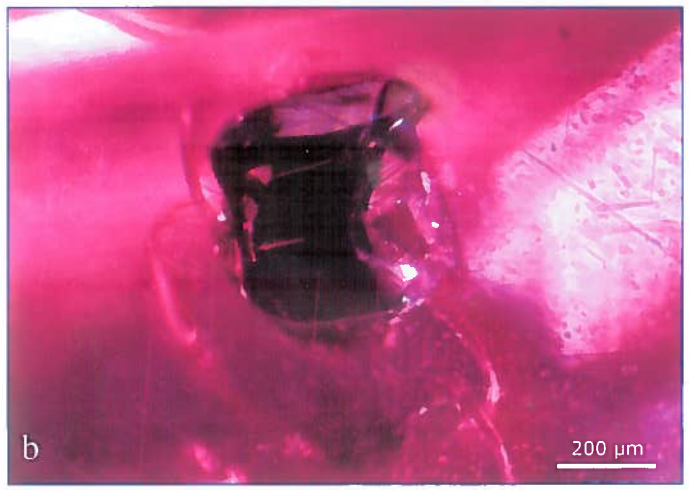
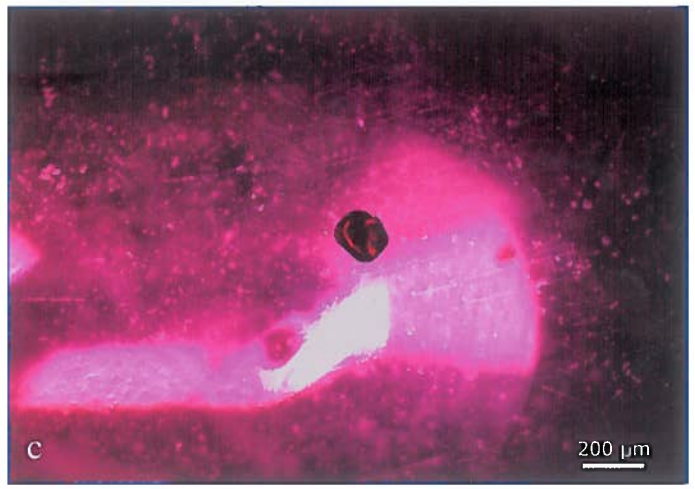


Figure 10c - Inclusions de rutile sous forme de soies rencontrées dans les rubis de Vatomandry avec lamelles et pointes de flèches (champ de vue ~.4 mm - photo A. Delaunay, LFG).



Figures 11a, 11b, 11c : Des cristaux noirs de rutile sont également présents et s'ajoutent à la liste des d'inclusions type de ce matériau. Les inclusions de rutile peuvent être prismatiques





(11b) à subarrondies (11a). Quand le cristal est assez fin il laisse voir sa couleur rouge (11c) (champ de vue 13b ~1.4 mm, 13a et 13c ~2.2 mm - photos A. Delaunay, LFG).

Figure 12a - Des cristaux automorphes, transparents, aux faces légèrement arrondies, présentant un axe d'allongement et une section hexagonale qui nous permettent d'avancer que ce minéral est l'apatite. Ces cristaux d'apatite peuvent être de tailles variées, isolés ou en grappes (champ de vue ~3 mm - Photo J.-M. Arlabosse, GSP).

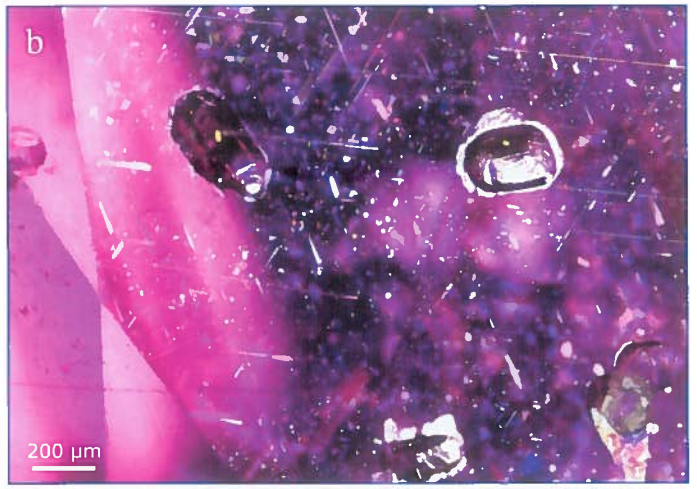
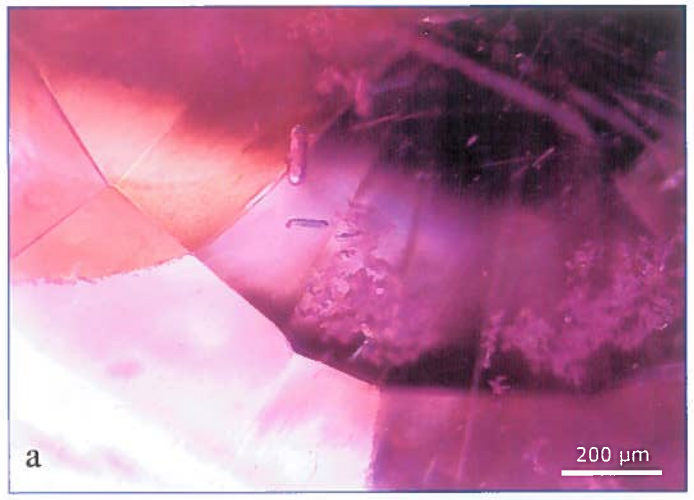
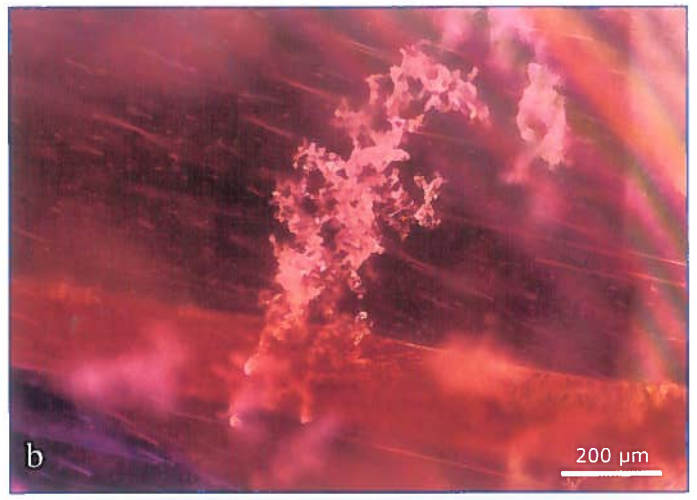


Figure 12b - Autour des inclusions prismatiques d'apatite des cernes d'éclatement dues aux éléments radioactifs présents dans les apatites peuvent être observés avec une lumière incidente (champ de vue ~2.2 mm - photo A. Delaunay, LFG).





Figures 13a, 13b - De petits cristaux de zircon automorphes isolés (15a) ou en fins agrégats faisant penser à de la mie de pain (15b) sont observables dans tous les rubis étudiés (champ de vue ~1.4 mm - photos A. Delaunay, LFG).

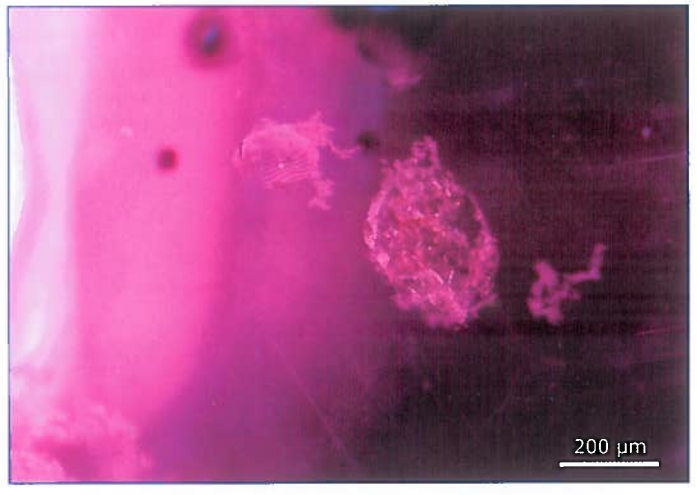


Figure 14 - inclusions lamellaires de mica (champ de vue ~1.4 mm - photos A. Delaunay, LFG).

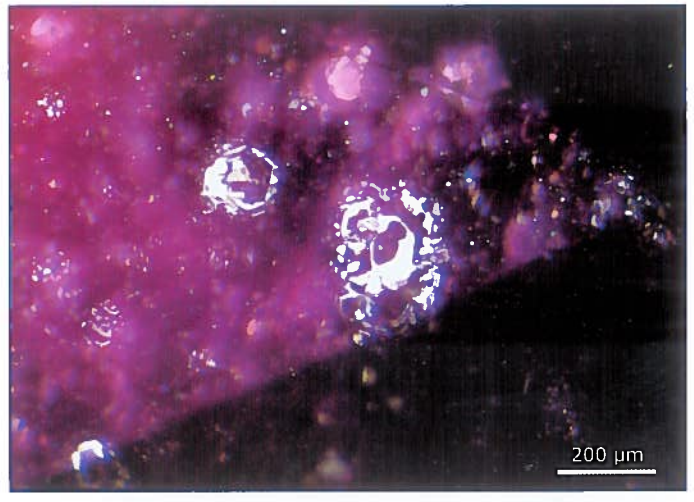


Figure 15 - Inclusions avec atolls irisés géométriques semblables à celles rencontrées dans les rubis de Thaïlande. Cette d'inclusion a été rencontrée que dans un rubis du lot (champ de vue ~1.4 mm - photo A. Delaunay, LFG).

Figure 16 - Plans de macles polysynthétiques observés entre polariseurs croisés (champ de vue ~2.2 mm - photo A. Delaunay, LFG).

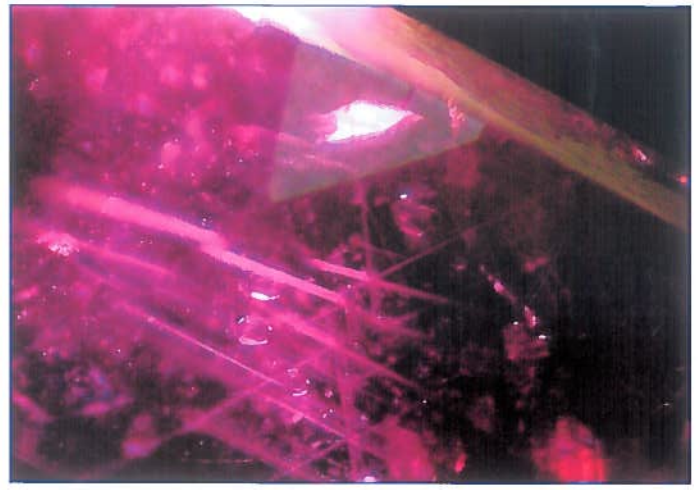


Figure 17 - Probables cils ou franges de boehmite déterminée en spectrométrie infrarouge suivant les intersections de plans de macles. Ce motif d'inclusion pourrait être rapproché des canaux de Rose vide décrits par Fritsch *et al.* (2018) (champ de vue ~2 mm - Photo J.-M. Arlabosse, GSP).

celle des rubis gemmes trouvées dans d'autres pays. La concentration en fer est importante comparée au rubis du Myanmar mais certains rubis de Vatomandry ont une concentration en fer dans la moyenne basse des autres rubis provenant de Thaïlande ou Mozambique. Les rubis du Myanmar sont ceux qui contiennent le plus de vanadium. Cependant, il faut noter que les rubis de Vatomandry ont une concentration en vanadium intermédiaire entre ceux du Myanmar plutôt riche en vanadium et ceux de Thaïlande ou Mozambique qui en contiennent en très faible quantité.

La spectrométrie FTIR

En spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier, des profils de minéraux dit «contaminants» sont souvent visibles (Figure 21). Cette observation, avec l'intégrité physique des inclusions, témoigne encore un peu plus du naturel de ces pierres. Ces minéraux secondaires témoignent des conditions de formation de ces gisements de rubis.

La kaolinite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) est le minéral contaminant le plus répandu dans les rubis étudiés. Ses pics principaux sont vers

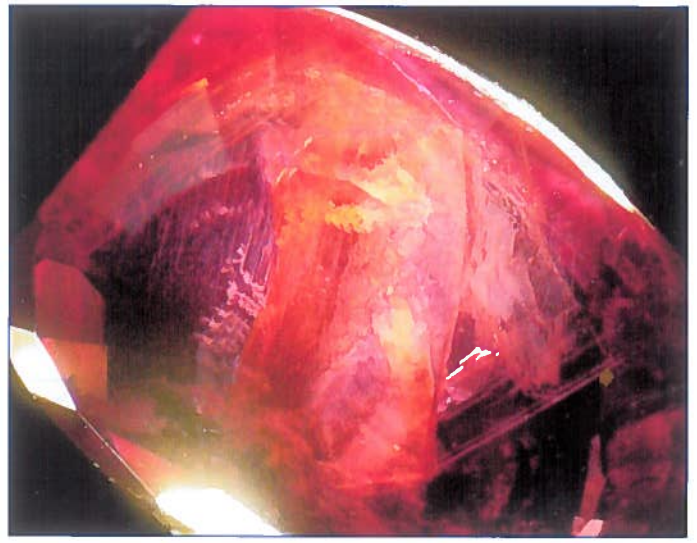


Figure 18 - Dans les fractures de ce rubis, des matériaux secondaires de remplissage orange (limonite et/ou autres oxydes de fer) sont observables (champs de vue ~6 mm – photo J.-M. Arlabosse, GSP).

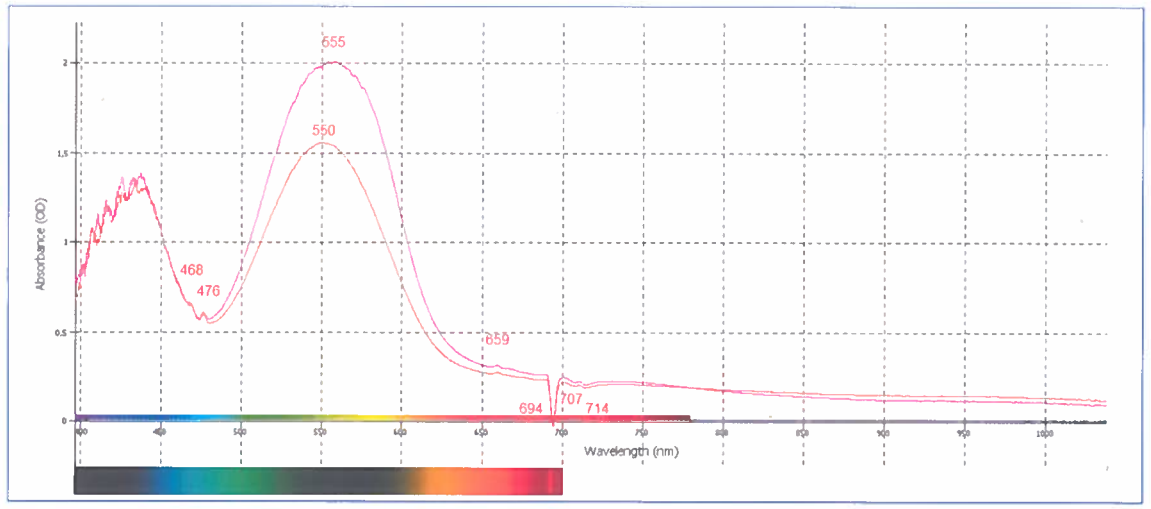


Figure 19 - Spectre Vis-NIR type (en lumière polarisée) pour les rubis de ce gisement.
Le rayon extraordinaire (tracé orange) est porteur de la couleur orange-rosé du pléochroïsme et montre une bande d'absorption centrée vers 550 nm. Le rayon ordinaire (tracé fuchsia) est porteur de la couleur fuchsia du pléochroïsme. Dans ce cas la bande d'absorption est plus intense et plutôt vers 555 nm.
Avec ce spectromètre et son système de capture, le doublet 468, 476 nm (lignes B du chrome) peut être vu ainsi que le pic à 694 nm en régime d'émission (pic vers le bas).
NB : La partie du spectre entre 400 et 430 nm est sujette à caution car le spectromètre montre un artefact dans cette zone (baisse de signal associée à un fort bruit de fond).

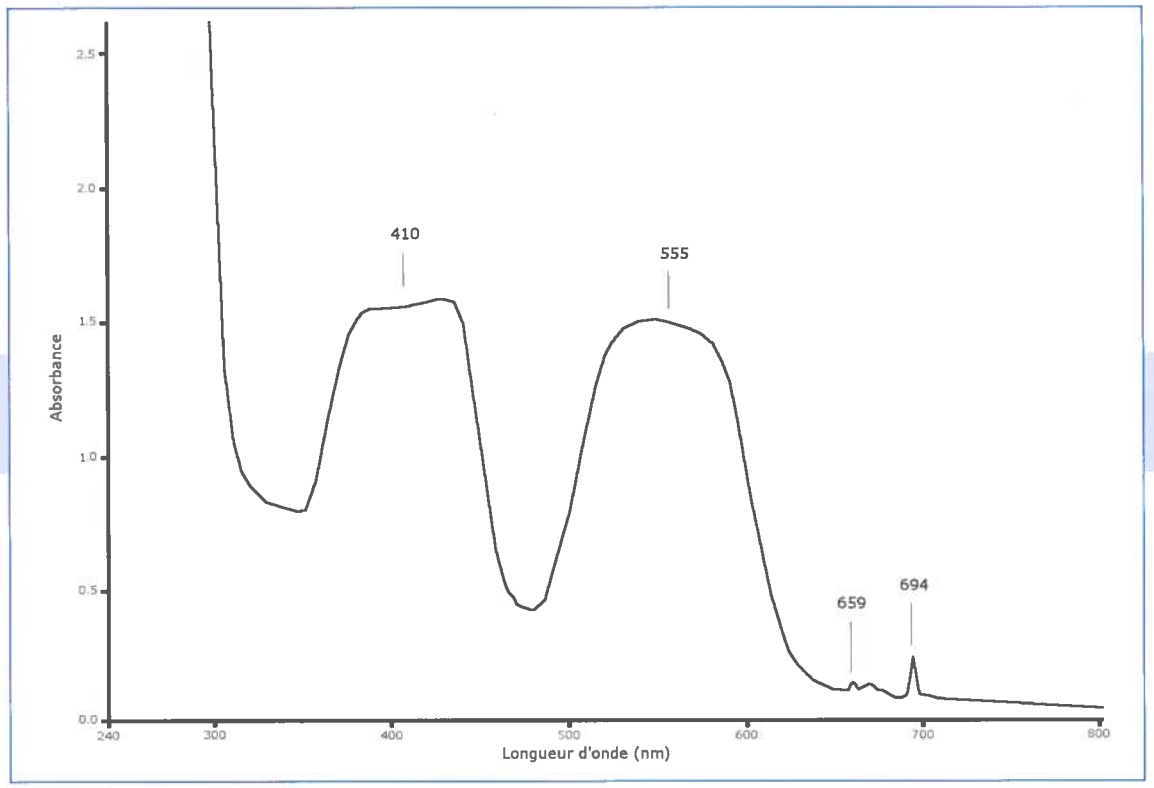


Figure 20 - Spectre UV-Vis type (lumière non polarisée) d'un rubis de ce gisement. Ce spectromètre et son système de capture, permettent de voir que le déplacement de la première bande est à 410 nm et que le cut-off (augmentation brutale de l'absorption) commence assez haut en raison de la forte teneur en fer. Le pic à 694 nm est ici visible dans son régime d'absorption (pic vers le haut).

	Madagascar (rubis étudiés)	Myanmar	Thaïlande	Mozambique
Cr_2O_3	0.64 - 1.32	0.46 - 1.88	0.54 - 0.96	0.70 - 2.22
Fe_2O_3	0.27 - 0.99	0.03 - 0.09	0.71 - 0.94	0.30 - 2.13
K_2O	0.07 - 0.46	0.01 - 0.17	0.01 - 0.10	0.02 - 0.73
V_2O_3	0.007 - 0.094	0.04 - 0.21	0.002 - 0.004	0.00 - 0.004
Ga_2O_3	0.018 - 0.051	0.01 - 0.18	0.009 - 0.013	0.007 - 0.033
TiO_2	0.009 - 0.079	0.02 - 0.13	0.03 - 0.10	0.01 - 0.07

Table I - Concentration des impuretés chimiques minimum à maximum des 16 rubis de Madagascar - Vatomandry comparée à celles de rubis provenant de différents gisements analysés au LFG en pourcentage de masse.

3694, 3649 et 3622 cm^{-1} (Hughes, 2017). Parfois de larges bandes, pouvant correspondre à la goethite sont vues vers 3380 et 3169 cm^{-1} (Hughes, 2017).

Différents épaulements vus entre 1900 et 2200 cm^{-1} témoignent de la présence d'autres minéraux contaminants. La boehmite pourrait par exemple correspondre aux épaulements vus vers 1988 et 2075 cm^{-1} (Hughes, 2017 ; Bowersox *et al.*, 2000). Le pic à 3309 cm^{-1} indiquant la présence de groupements structuraux hydroxyles (OH) n'est quasiment jamais perceptible (une toute petite occurrence sur un seul des 16 échantillons).

La kaolinite identifiée par spectrométrie infrarouge dans les fractures des rubis indique que ceux-ci ont séjournés dans un environnement où des interactions importantes avec des fluides d'altération météoriques ont eu lieu dans une couche superficielle de sédiments isolés du lit de la rivière. La présence de limonite et d'autres oxydes de fer provenant par exemple d'un sol latéritique est une seconde preuve de l'origine secondaire de ces rubis. Ils ont pu séjourner dans un paléoplacer puis être remobilisés dans le placer actuel. Tous ces minéraux secondaires sont des preuves de l'altération superficielle subie par les roches après leur dépôt alluvial.

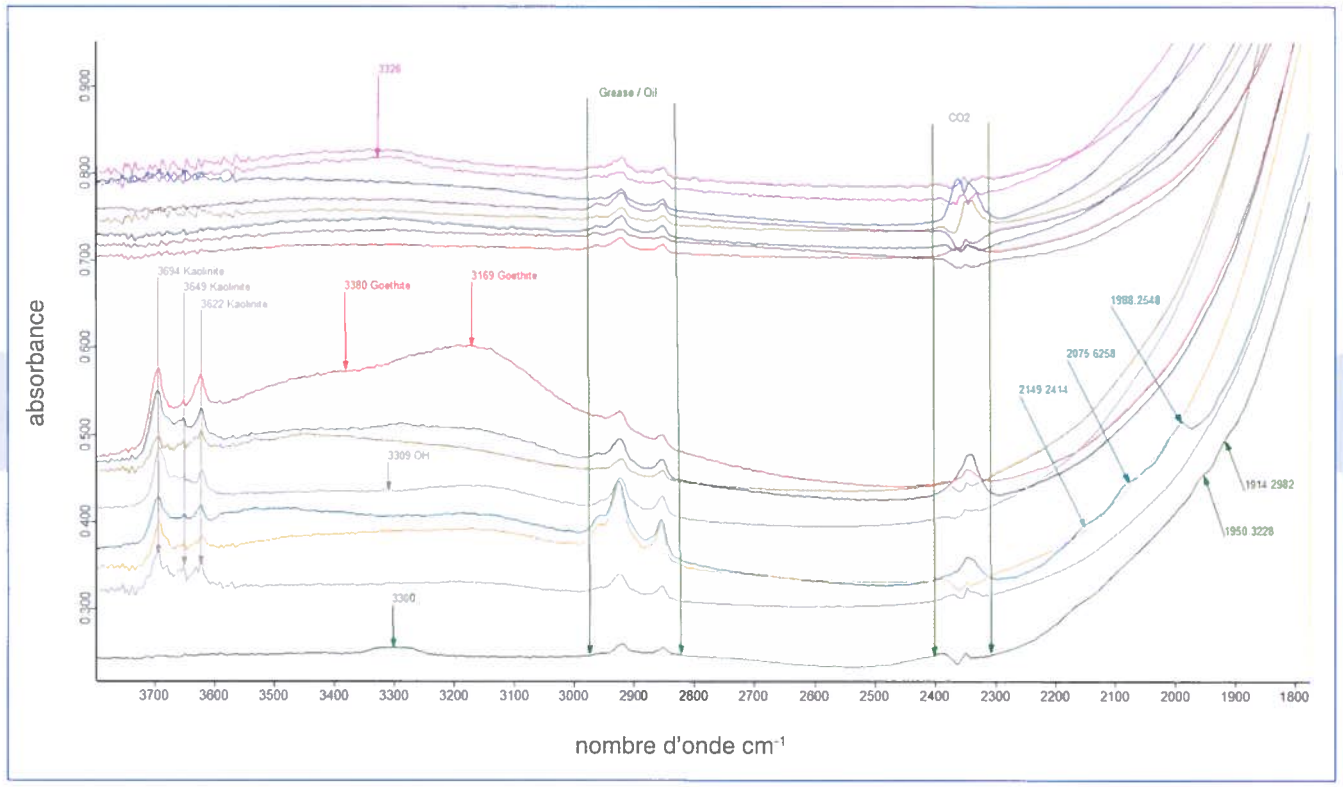


Figure 21 - Vue des différents spectres infrarouges dans la zone d'intérêt de 1800 à 3800 cm^{-1}. Quasiment la moitié des pierres de cette étude montrent de la kaolinite comme minéral dit « contaminant » (Pics à 3694, 3649 et 3622 cm^{-1}). La goethite ainsi que d'autres « contaminants » peuvent être perçus selon les cas (e.g. possiblement boehmite).
(Note : Les pics récurrents situés entre 2800 et 3000 cm^{-1} ou entre 2300 et 2400 cm^{-1} sont inhérents aux résidus de graisse et de CO_2).

Conclusion

Les rubis de la région de Vatomandry sont reconnus depuis le début des années 2000. L'extraction de rubis sur une nouvelle parcelle par Nicolas Lenne et son envie de partage pour faire reconnaitre et tracer ces gemmes nous a permis de faire cette étude. Les données recueillies dans cette étude sont similaires à celles déjà publiées sur les rubis de cette zone : il s'agit de rubis issus de placers formés par l'érosion de coulées basaltiques porteuses de rubis (et de saphirs). En termes d'inclusion, les cristaux de rutile et de zircon (notamment en grappe) sont caractéristiques de ce gisement. La présence de minéraux secondaires dans les fractures des rubis est une donnée intéressante qui nous renseigne sur la formation de ces rubis. La kaolinite notamment, minéral d'altération, indique que des transformations minéralogiques ont opérées lors de la formation du placer. Les analyses spectrométriques et chimiques ont permis de mieux définir ces rubis. Leur teneur en vanadium est plus importante que celle caractérisée pour les rubis d'origine basaltique de Thaïlande ainsi que les rubis métamorphiques associés à des amphibolites des gisements du Mozambique. Par contre, les teneurs en fer sont plus importantes que celles trouvées pour les rubis associés aux marbres du Myanmar. Ces éléments chimiques contrastés sont des critères importants et complémentaires pour leur discrimination géologique et/ou géographique. ■

Bibliographie

Bowersox G. W., Foord E. E., Laurs B. M., Shigley J. E., and Smith C. P., 2000, Ruby and sapphire from Jegdalek Afghanistan, Gems & Gemology, Vol. 36, No. 2 pp. 110-126.

Fritsch E., Notari F., Caplan C., Hainschwang T., 2018, Are boehmite needles in corundum Rose channels? – European Geoscience Union - Geophysical Research Abstracts, Vol. 20, EGU2018-19493.

Giuliani G., Caumon G., Rakotosamizanany S., Ohnenstetter D., Rakotondrazafy M., 2014, Classification chimique des corindons par analyse factorielle discriminante : application à la typologie des gisements de rubis et saphirs, Revue de l'Association Française de Gemmologie, n°188, pp. 14-22.

Giuliani G., Ohnenstetter D., Rakotondrazafy M., Fallick A.E., Rakotosamizanany S., Andriamamonjy A., Ralantoarison Th, Razanatseheno M., Dunaigre C., Schwarz D., 2007, Les gisements de corindons gemmes de Madagascar, Revue de l'Association Française de Gemmologie, n°159, pp. 14-28.

Gübelin E. J., Koivula J. I., 2004, Photoatlas of inclusions in gemstones Vol. 1, 4th Edition, 532 p.

Gübelin E. J., Koivula J. I., 2009, Photoatlas of inclusions in gemstones Vol. 3, 1st Edition, 672 p.

Hughes R. W. (with Wimon Manorotkyul and E. Billie Hughes), 2017, Ruby and Sapphire – a gemologist's guide, 2nd Edition, 734 p.

Lacroix A., 1922, Minéralogie de Madagascar, 3 vol., A. Challamel (Ed.), Paris

Pardieu V., Rakotosaona N., 2012, Ruby and sapphire rush near Didy, Madagascar (april – june 2012), GIA Thailand, News from research, https://www.gia.edu/doc/Didy_Madagascar.pdf

Rakotosamizanany S., Giuliani G., Ohnenstetter D., Rakotondrazafy A.F.M., Fallick A.E., 2009a, Les gisements de saphirs et rubis associés aux basaltes alcalins de Madagascar, caractéristiques géologiques et minéralogiques. 1ère partie : Caractéristiques géologiques des gisements, Revue de l'Association Française de Gemmologie, n° 169, pp. 13-21

Rakotosamizanany S., Giuliani G., Ohnenstetter D., Rakotondrazafy A.F.M., Fallick A.E., 2009b, Les gisements de saphirs et rubis associés aux basaltes alcalins de Madagascar, caractéristiques géologiques et minéralogiques. 2ème partie : Caractéristiques minéralogiques, Revue de l'Association Française de Gemmologie, n° 170, pp. 9-18

Schoor M., Boulliard J.-C., Gaillou E., Hardouin Duparc O., Estève I., Baptiste B., Rondeau B., Fritsch E., 2016, Plastic deformation in natural diamonds: Rose channels associated to mechanical twinning. Diamond and Related Materials, Vol. 66, pp. 102-106.

Schwarz D., Schmetzer K., 2001, Rubies from the Vatomandry area, eastern Madagascar, Journal of Gemmology, Vol. 27, n°7, pp. 409-416