

REVUE DE GEMMOLOGIE A.F.G.

A S S O C I A T I O N F R A N Ç A I S E D E G E M M O L O G I E





1 Éditorial

Didier Gard

3 Sommaire

DOSSIER CENTRAL

- 4 Les saphirs multicolores de Sahambano et Zazafotsy, région granulitique d'Ihosy, Madagascar
Théogène Ralantoarison, Alfred Andriamamonjy, Yohann Offant, Gaston Giuliani, Amos Fety Michel Rakotondrazafy, Daniel Ohnenstetter, Dietmar Schwarz, Christian Dunaigre, Anthony Fallick, Madison Razanatseheno, Saholy Rakotosamizanany, Bernard Moine, P. Baillet

BRÈVES DE LA GEMMOLOGIE

- 14 Émeraude synthétique hydrothermale russe à « givres »
Jean Marie Arlabosse

CULTURE & HISTOIRE

- 20 La présence du jade dans la campanologie chinoise
Étude d'une cloche gantha d'époque Qing
Erik Gonthier, Laurent Schroeder

COMMUNIQUÉ

- 24 Les VIII^{es} Rendez-Vous Gemmologiques de Paris®

LA LETTRE

- 25 Les activités du Cercle de l'Octaèdre
- 29 La librairie de l'AFG

Les saphirs multicolores de Sahambano et Zazafotsy, région granulitique d'Ihosy, Madagascar*

Théogène Raïantoarison¹, Alfred Anariamamonjy¹, Yohann Offant², Gaston Giuliani^{3,4*}, Amos Fety Miche¹, Rakotondrazafy¹, Daniel Ohnenstetter⁴, Dietmar Schwarz⁵, Christian Dunajce⁵, Anthony Fallick⁶, Madison Razanatsiheno¹, Saholy Rakotosamizarany¹, Bernard Moine⁷, P. Ballou⁴

Résumé

Les gisements de saphirs multicolores de Sahambano et de Zazafotsy se situent dans le domaine granulitique du Sud de Madagascar. Il s'agit de gisements métamorphiques d'un type nouveau situé dans une zone de cisaillement, et résultant de l'interaction de fluides métasomatiques sur une roche hôte formée par un gneiss feldspathique. La gamme de couleur rencontrée pour les saphirs multicolores est fonction de la variation du rapport Fe/Cr pour une teneur en fer quasiment constante.

Abstract

The multi-coloured sapphire deposits of Sahambano and Zazafotsy are located in the granulitic domain of southern Madagascar. They define a new type of metamorphic deposit resulting from the interaction of metasomatic fluids on feldspathic gneisses in a shear zone. The variety of colour for sapphires is function to the variation of the Fe/Cr ratio at a near constant iron content.

Les gisements de corindons de Madagascar

Les gisements de corindons se situent pour la plupart dans les terrains métamorphiques précambriens et les terrains volcaniques plio-quadernaires de Madagascar (Figure 1). Les gisements primaires peuvent être subdivisés en trois groupes suivant leur cadre géologique (Rakotondrazafy *et al.*, 2005) : i) magmatique, et associés à des syénites, des pegmatites et des xénolithes de pyroxénites contenus dans des basaltes alcalins ; ii) métamorphique ; et iii) métasomatique et reliés à l'interaction de fluides sur différents protolithes précambriens (gneiss, granulites acides et mafiques à ultra-mafiques, marbres et cipolins). Les gisements secondaires sont d'origine détritique. Plusieurs types peuvent être distingués suivant leur environnement géologique c'est-à-dire soit sédimentaire avec

les paléoplacers localisés dans les sédiments triasiques de l'Isalo au sud-ouest de la ville d'Ihosy, soit volcanique avec les placers situés dans le massif de l'Ankaratra sur le plateau central et la province volcanique de la Montagne d'Ambre dans le Nord de l'île, et finalement les placers d'origine inconnue comme ceux d'Andilamena et de Vatomaniry (Figure 1).

Les gisements de corindons en contexte métamorphique

Ces gisements se localisent dans le domaine granulitique du Précambrien du Sud de Madagascar (Figure 2). Le socle Précambrien comprend des reliques de croûte continentale ancienne (de Wit, 2003) qui ont été remobilisées, entre 950 et 450 Ma, au cours de l'orogénèse panafricaine (Kröner, 1984). Le processus de collision entre l'Est et l'Ouest du continent Gondwana provoqua la formation d'une ceinture mobile néo-protérozoïque (~650 Ma), en faciès granulite. Les terrains granulitiques sont divisés en quatre groupes lithostratigraphiques (Besairie, 1967 ; de Wit, 2003), correspondant à la juxtaposition de blocs tectoniques de différents niveaux crustaux (Martelat *et al.*, 1997 ; 2000 ; de Wit, 2003). Ce patchwork est dû aux mouvements relatifs de zones de cisaillement majeures qui affectèrent la croûte continentale. La température du métamorphisme est de l'ordre de 750°C dans tous les blocs ; la pression est de 11 à 8 kbar à l'ouest, et de 5 à 3 kbar à l'est (Nicollet, 1990). Les granites sont abondants dans la partie orientale alors que les roches basiques et les anorthosites prédominent dans la partie occidentale.

Les gisements de corindons se rencontrent dans les différents blocs tectoniques mais ils sont associés aux zones de cisaillements (Figure 2). Ces structures tectoniques ont joué le rôle de drains pour la circulation des fluides qui ont réagi sur les roches hôtes des corindons. La nature des roches varie depuis des gneiss feldspathiques (gisements de Zazafotsy et Sahambano), des cordiérites (Iankaroka et Ambatomena), des amphibolites et des anorthosites (Ejeda, Fotadrevo, Vohitany and Gogogogo) jusqu'à des marbres impurs (skarns

¹ Faculté des Sciences, Département des Sciences de La Terre, Université d'Antananarivo, Ambohitsaina, BP 906, Antananarivo 101, Madagascar

² Cerege, Europole Méditerranéen de l'Arbois, BP 80, 13545-Aix-en-Provence

³ Institut de Recherche pour le Développement, DME, UR154 LMTG, Toulouse, France

^{4*} Centre de Recherches Pétrographiques et Géochimiques/Centre National de la Recherche Scientifique, BP 20, 54501-Vandœuvre-lès-Nancy, France. giuliani@crpg.cnrs-nancy.fr

⁵ Gemological Laboratory, Mathofstrasse, 102, CH-6000 Lucerne 9, Switzerland

⁶ Isotope Geosciences Unit, Scottish Universities Environmental Research Centre, East Kilbride, Rankine Avenue, Glasgow G75 0QF, Scotland, UK

⁷ Piac, 82400-Valence d'Agen

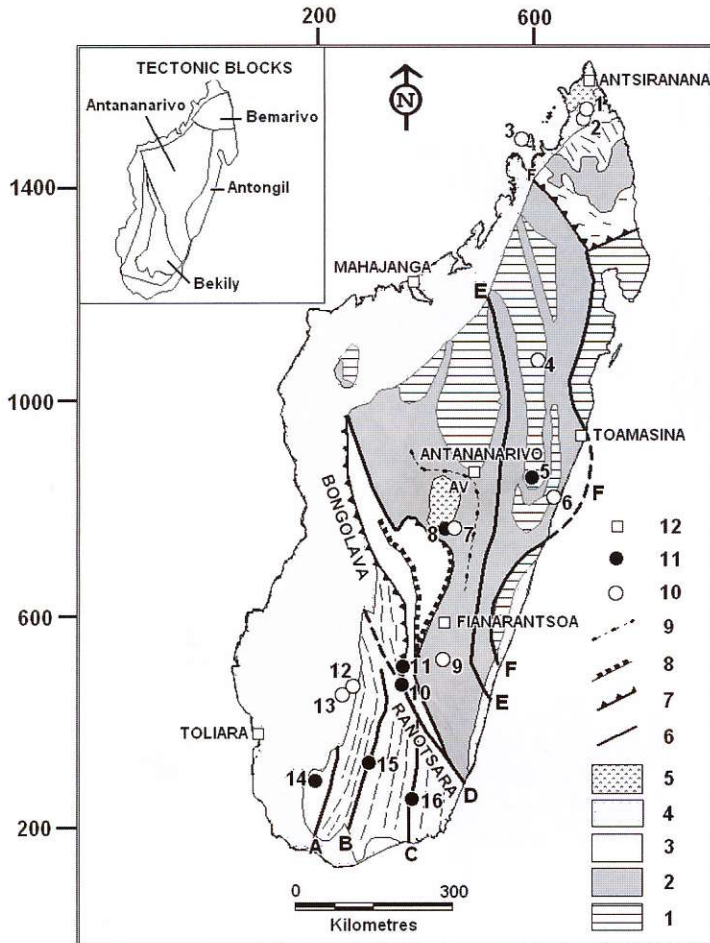


Figure 1 : Le Précambrien de Madagascar avec ses structures tectoniques majeures et ses gisements de corindons (modifié d'après de Wit (2003)).

- 1 Archéen, 2 Archéen indifférencié et terrains néoproterozoïques, 3 Méso-néoproterozoïque,
- 4 Couverture phanérozoïque, 5 Provinces volcaniques du Néogène au récent 6 Zones de cisaillement avec A - Ampanihy, B = Vorokafotra, C = Tranomaro, D = Ranotsara-Bongolava, E - Ifondiana-Angavo, F - Betsimisaraka, 7 Chevauchements, 8 Détachements, 9 AV = Virgation d'Antananarivo,
- 10 Placers à corindons avec 1 - Anvorano, 2 = Ambondromifehy, 3 = Nosy Be, 4 = Andilamena, 6 - Vatomaniry, 7 - Kianjanakanga-Mandrosahasina, 9 = Miarinarivo, 12 = Ilakaka, 13 = Sakahera,
- 11 Gisements primaires avec 5 = Ambohitraneitra (Beforona), 8 - Socmiakatra, 10 - Sahambano, 11 - Zazafotsy, 14 - Ejeda-Fotadrevo area, 15 = Ambetomena, 16 = Tranomaro area (Andranondambo) 12 - Ville

de Tranomaro). Les "sakénites" décrites par Lacroix (1941) se trouvent dans des séries métamorphiques formées par des paragneiss comprenant des intercalations d'amphibolite, de clinopyroxénite et de marbre impur (indices de Sakeny, Vohidava, Ejeda-Anavoaha et de Tranomaro-Andranondambo). Les "sakénites" correspondent à des veines feldspathiques (plagioclase) ou à des ségrégations de plagioclase ± spinelle ± corindon ± phlogopite et ± hibonite.

Les gisements de corindons associés aux gneiss feldspathiques

Le gisement de Sahambano

Ce gisement se situe à 30 km à l'Est de la ville d'Ihoso (Figure 2). Le gisement a été découvert en 1999 et il est exploité par la

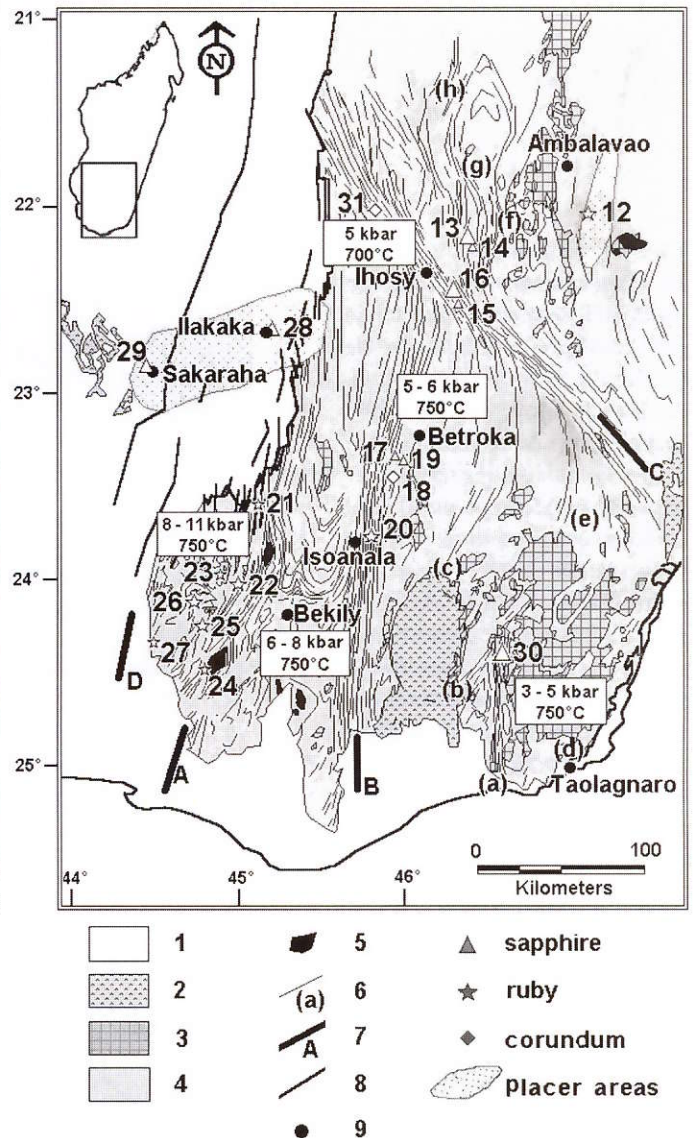


Figure 2. Carte structurale et lithologique du Sud-Est de Madagascar avec ses gisements de corindons (modifié d'après Martelat *et al.*, 2000)

- 1 Couverture sédimentaire phanérozoïque, 2 Terrains volcaniques de l'Androy,
3. Granites, charnockites et tonalites, 4 Socle avec les différentes unités métamorphiques précambriennes, 5 Anorthosités; 6 Zones de cisaillement mineures (a), (b), (c), (d), (e), (f), (g), (h); 7. Zones de cisaillement majeures avec A = Ampanihy, B = Beraketa, C = Ranotsara, 8 Foliation; 9 Village.

La pression (P en kbar) et la température (T en °C) sont de Ackermann *et al.* (1989), Nicollet (1990), et Moine *et al.* (1985)

société Tany Hafa S.A. Les cristaux de saphirs sont multicolores parfois polychromes mais rarement de qualité gemme : 100 kg de corindons prélevés dans le matériel extrait et lavé contiennent 24 kg de saphirs colorés avec 1 kg de cristaux translucides et 50 g de qualité gemme (Offant, 2005). La répartition des couleurs est de 15% de brun à orange, 5% d'orange à rose, 40% de rose à mauve, 5% de mauve à fuchsia et 35% de violet à bleu. L'utilisation de traitements thermiques est indispensable pour améliorer la couleur et la transparence des cristaux.

Cadre géologique

Le gisement se trouve dans le groupe Tranomaro, caractérisé par une grande abondance de paragneiss calciques et magnésiens et de leptynites. Il se situe dans la zone de cisaillement de Ranotsara, d'approximativement 30 km de large et 300 km de long, qui a été le siège d'une déformation ductile importante entre 600 et 500 Ma (Martelat *et al.*, 2000). Une datation Ar-Ar sur une biotite associée à une biotite à saphir a donné un âge à 492 ± 5 Ma (Giuliani *et al.*, en préparation). Des zones de mylonitisation et des zones de cisaillement dextres ainsi que des plis en fourreau sont fréquents dans les leptynites de Sahambano. Les saphirs se trouvent dans des lentilles de gneiss feldspathiques intercalées dans des leptynites (puits Dominique, Nono, Momo, Jeanne d'Arc et Ambinda Sud). Le cisaillement a été accompagné par l'ouverture de fractures qui ont permis aux fluides de circuler. L'interaction fluide-roche a provoqué une biotitisation des gneiss feldspathiques (Figure 3A). Les saphirs se trouvent dans des biotitites qui contiennent du spinelle et de la sillimanite, et dans des gneiss à saphirine composés de feldspath potassique, biotite, sillimanite, spinelle, saphirine, grenat et albite. Les saphirs se sont formés durant le stade prograde du métamorphisme à une température $\sim 650^\circ\text{C}$ et une pression ~ 5 kbar, et suivant la réaction métamorphique (Ralantoarison, 2006) : $3 \text{ hercynites} + \text{feldspath potassique} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{ corindons} + \text{annite}$.

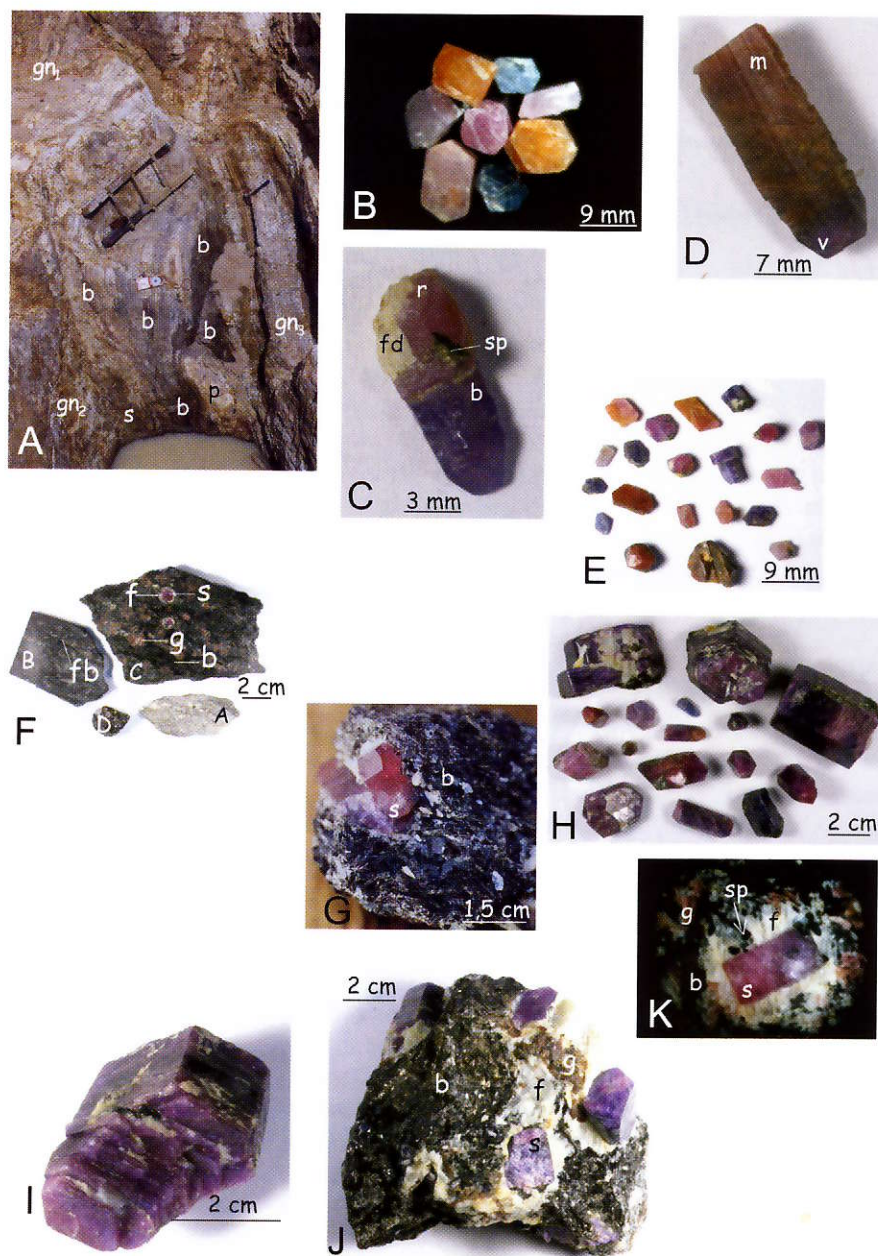


Figure 3 Gisements de Sahambano et de Zazafotsy

Gisement de Sahambano

A - Formation des biotitites à saphir le long de plans de fractures qui recoupent des gneiss feldspathiques (tranchée Momo). Le schiste à biotite (b) s'est développé sur un gneiss feldspathique à grenat (gn1) et un gneiss à saphirine (s). Une pegmatite (p) est recoupée par une biotitite. La bordure ouest de la tranchée est formée par une leptynite à biotite et grenat (gn3). Gneiss à sillimanite (gn2), biotite et grenat. Photo : G. Giuliani. — **B** - Saphirs multicolores. Photo : Y. Offant. — **C** - Cristal composite formé d'un prisme court rosé (r) et d'un prisme long bleuté (b). La zone de contact entre les deux prismes est brutale. fd= feldspath potassique ; sp= spinelle. Photo : P. Baillot. — **D** - Cristal composite formé d'un prisme long de couleur marron (m) chapeauté par un prisme court violet (v) où s'observent les faces du rhomboèdre et du pinacoïde. Photo : P. Baillot. — **E** - Cristaux de saphirs de différentes couleurs et de formes. Photo : P. Baillot

Gisement de Zazafotsy.

F - Gneiss feldspathique (A) affecté par des fissurations à biotite (B) provoquant une transformation totale du gneiss en biotitite à grenat et saphir (C). Les bordures des lentilles à saphirs sont formées parfois d'une alternance de biotitite et de tourmalinite (D) fb = fissuration à biotite ; s = saphir ; f = feldspath ; b = biotite ; g = grenat Photo : P. Baillot — **G** - Biotite (b) à saphir rose (s). Photo : G. Giuliani — **H** - Saphirs de différentes couleurs et d'habitus. Photo : P. Baillot — **I** - Croissance cristalline d'un saphir rose à mauve affectée par des plans de glissements. Photo : P. Baillot. — **J** - Cristal de saphir (s) entouré d'une couronne de réaction métamorphique à feldspath potassique (f) dans une matrice à biotite (b) et grenat (g). Photo : P. Baillot. — **K** - Réaction de rétroformation du saphir (s) en feldspath potassique (f) et spinelle (sp) dans une matrice à biotite (b) et grenat (g). Photo : Y. Offant.

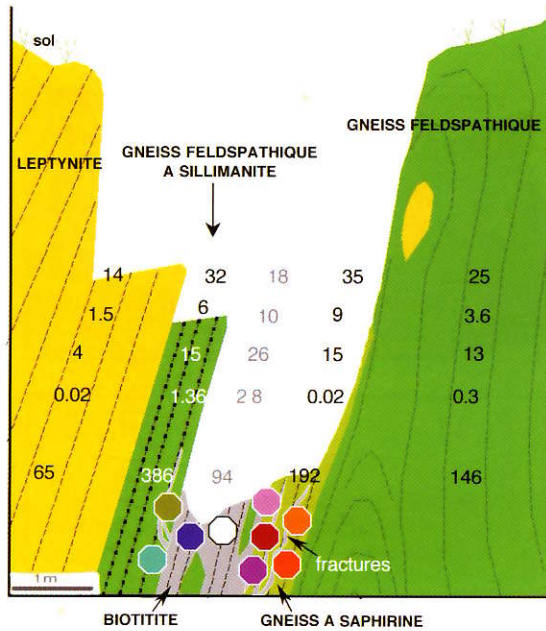
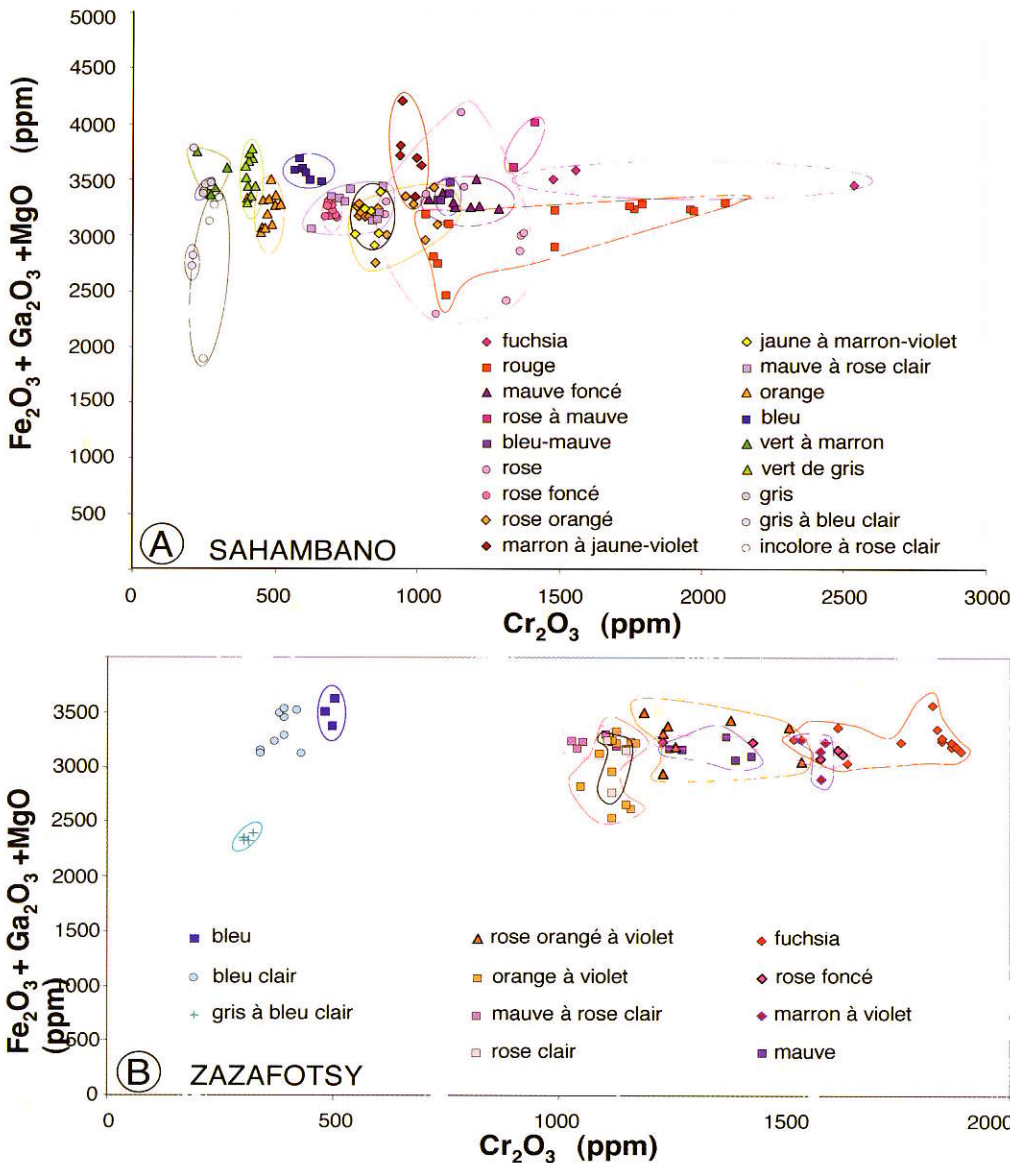


Figure 4 : Coupe géologique schématique de la tranchée Momo dans le gisement de saphir de Sahambano (Ralantoanson, 2006). La minéralisation est contenue dans des gneiss feldspathiques biotitisés. La teneur respective en Al, Mg, Fe, Ti (% poids) et en Cr (ppm) pour les différentes roches hôtes et les roches métasomatiques (biotite) est reportée. La distribution des saphirs colorés est reportée dans les différentes zones. Les éléments majeurs et traces sur roches totales ont été déterminés par ICP-MS au laboratoire du SARM (CRPG/CNRS).

Minéralogie

La taille des cristaux varie du mm à 5 cm. Les saphirs montrent toute une gamme de couleurs qui est fonction de la variation de leur teneur en chrome et en fer, depuis l'incolore, gris, grisâtre "vert de gris", bleu, orange, rose, rose orangé, rose foncé, violet, mauve, marron au rouge et fuchsia (Figure 3B, E). Les cristaux sont automorphes. Ils présentent des habitus prismatiques courts ou longs qui sont souvent associés au rhomboèdre (10.1), au prisme hexagonal (10.0) ou (11.0) et aux deux pinacoïdes (00.1) ; parfois, ils possèdent des habitus laminaires comprenant le pinacoïde ou des formes prismatiques constituées de dipyramides hexagonales associées au pinacoïde (00.1) et/ou au prisme hexagonal. Les inclusions solides déterminées dans les saphirs par une étude réalisée au microscope électronique à balayage sont le feldspath potassique, le zircon, la barytine, le spinelle, la monazite (variété chéralite), la sillimanite, le diaspore, l'albite et la pyrite.



Les saphirs apparaissent dans des zones métasomatiques formées au dépens des gneiss

Figure 5 Diagramme Cr₂O₃ en fonction de Fe₂O₃ + Ga₂O₃ + MgO (en ppm) des différents saphirs colorés de Sahambano (A) et Zazafotsy (B). Les sections polies de saphirs ont été analysées par la microsonde électronique CAMECA SX100 (Université Nancy I). Les conditions analytiques utilisées : tension 15 kv, courant 10 nA, temps de comptage 20s pour Al, et 25 kv, 150 nA, 120s pour les éléments traces.

feldspathiques peralumineux qui ont fourni l'aluminium et les éléments chromophores (Cr, Fe, Ti) indispensables à la formation et à la coloration du saphir (Figure 4). La distribution des couleurs est contrôlée par la lithologie : le bleu est rencontré dans les biotites, le vert à marron et "vert de gris" dans les gneiss feldspathiques à sillimanite, et le rouge à fuchsia, rose à rose orangé se situent dans les gneiss feldspathiques à saphirine. Les autres couleurs sont distribuées à l'interface biotite-gneiss feldspathique à saphirine biotitisé.

Chimie des saphirs

Les éléments majeurs et traces de plus de 17 saphirs de différentes couleurs ont été analysés à la microsonde électronique CAMECA SX100 de l'Université de Nancy I. Les résultats sont présentés dans le Tableau 1. Des teneurs significatives en Fe, Cr, Mg, Ga et Ti ont été mises en évidence. La teneur moyenne en Fe_2O_3 est de 2800 ppm et elle peut atteindre 4000 ppm ; la teneur en Cr_2O_3 est comprise entre 300 et 2500 ppm. Les teneurs en Ga_2O_3 et MgO sont comprises respectivement entre 90 et 220 ppm et 70 et 130 ppm. La teneur en TiO_2 est significative pour les cristaux de couleur verte à marron à "vert de gris", et en dessous des limites de détection pour les autres couleurs (~ 22 ppm). La Figure 5A montre que la couleur est fonction du rapport Fe/Cr pour une teneur en fer quasiment constante (~ 3200 ppm en Fe_2O_3) : forte teneur en chrome pour la couleur rouge à fuchsia et basse teneur en

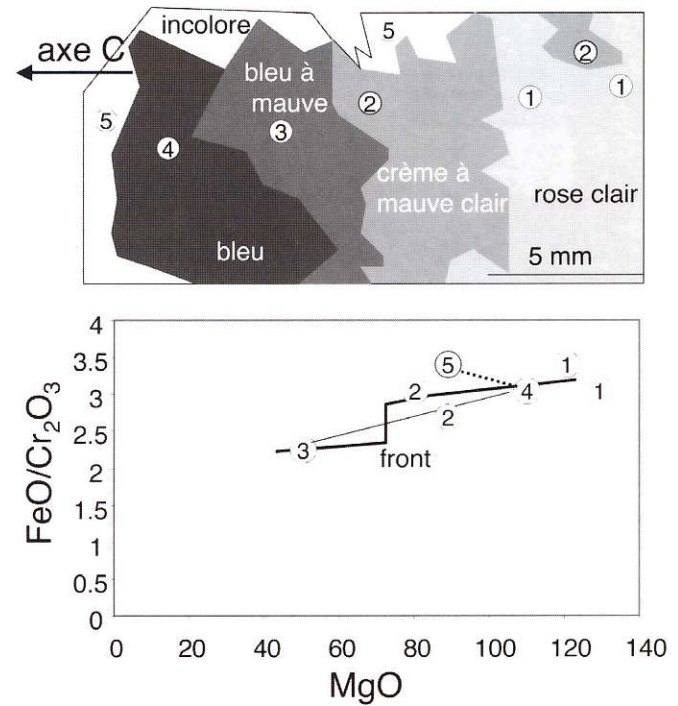


Figure 6 : Coupe d'un saphir coloré de Sahambano mettant en évidence la variation chimique des zones internes aux zones externes du cristal dans la représentation MgO en fonction du rapport FeO/Cr_2O_3 .

chrome pour les saphirs incolores et bleus. La teneur en chrome est toujours inférieure à celle du fer et le corindon peut-être appelé saphir et non rubis malgré sa couleur fuchsia ou rouge. La couleur rose orangé qui est la couleur attribuée

couleur	SAHAMBANO											
	rouge	fuchsia	rose-vio et	rose	rose foncé	rose orange	orange	vert de grs	marron à jaune-violet	bleu	bleu clair	incolore
Al_2O_3	99,2	99,67	99,08	99,80	99,60	99,28	99,90	98,67	99,38	99,35	99,41	97,99
MgO	0,008	0,009	0,011	0,012	0,009	0,009	0,007	0,013	0,010	0,013	0,009	0,012
TiO_2	bdl	bdl	0,008	0,006	bdl	bdl	bdl	0,013	0,012	0,013	0,012	0,011
V_2O_5	bdl	bdl	0,008	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	bdl	0,009	0,009	bdl
Cr_2O_3	0,208	0,253	0,140	0,103	0,068	0,102	0,047	0,043	0,094	0,059	0,096	0,027
FeO	0,269	0,291	0,329	0,276	0,273	0,242	0,284	0,289	0,315	0,301	0,293	0,254
Ga_2O_3	0,022	0,013	0,021	0,017	0,018	0,017	0,008	0,009	0,011	0,013	0,015	0,019
total	99,71	100,24	99,60	100,21	99,97	99,65	100,25	99,04	99,83	99,75	99,84	98,31
couleur	ZAZAFOTSY											
	fuchsia	rose foncé	marron à violet	mauve	rose orangé à violet	orange à violet	mauve à rose clair	rose clair	bleu	bleu clair	gris à bleu clair	
Al_2O_3	98,63	98,64	99,22	98,66	99,25	98,64	99,51	99,00	99,14	99,07	100,04	
MgO	0,008	0,006	bdl	0,004	0,012	0,006	0,011	0,007	0,011	bdl	0,013	
TiO_2	bdl	0,006	0,010	0,005	0,005	0,006	0,008	0,002	0,007	0,016	0,015	
V_2O_5	0,005	0,004	0,006	0,005	0,007	0,004	0,002	0,005	0,005	0,007	0,007	
Cr_2O_3	0,188	0,113	0,158	0,143	0,151	0,113	0,138	0,111	0,050	0,034	0,032	
FeO	0,299	0,306	0,294	0,288	0,308	0,306	0,310	0,307	0,314	0,309	0,214	
Ga_2O_3	0,012	0,009	0,022	0,014	0,016	0,009	0,022	0,010	0,014	0,005	0,012	
total	99,14	99,08	99,71	99,12	99,75	99,09	100,00	99,44	99,54	99,44	100,33	
couleur	SOAMIAKATRA						ILAKAKA					
	rouge	fuchsia	rose-vio et	rose	rose foncé	rose orange	rouge	fuchsia	rose-vio et	rose	rose foncé	rose orange
Al_2O_3	98,27	99,61	97,55	97,73	96,64	98,16	97,70	97,80	97,18	97,85	97,66	97,39
MgO	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na	na
TiO_2	0,094	0,006	0,022	0,034	0,042	0,028	0,042	0,054	0,027	0,007	bdl	bdl
V_2O_5	0,007	0,006	bdl	bdl	0,042	0,060	0,062	0,086	bdl	bdl	bdl	bdl
Cr_2O_3	0,383	0,035	0,630	0,730	0,989	0,857	0,932	0,798	0,830	0,222	0,328	0,557
FeO	0,562	0,327	0,503	0,524	0,509	0,521	0,525	0,527	0,513	0,259	0,198	0,273
Ga_2O_3	bdl	0,007	0,011	0,009	0,003	0,010	0,007	0,009	0,011	0,013	0,014	bdl
total	99,32	99,99	98,72	99,03	98,22	1,476	99,27	99,19	98,64	98,35	98,20	98,22

bdl = en dessous de la limite de détection; limite de détection par élément (en ppm) Mg = 34, Ti = 22, V = 22, Cr = 26, Fe = 24, Ga = 43
na = non analyse

Tableau 1 : Composition chimique (en % poids) des saphirs de Sahambano et de Zazafotsy, et des rubis de Soamiakatra et d'Ilakaka pour comparaison.

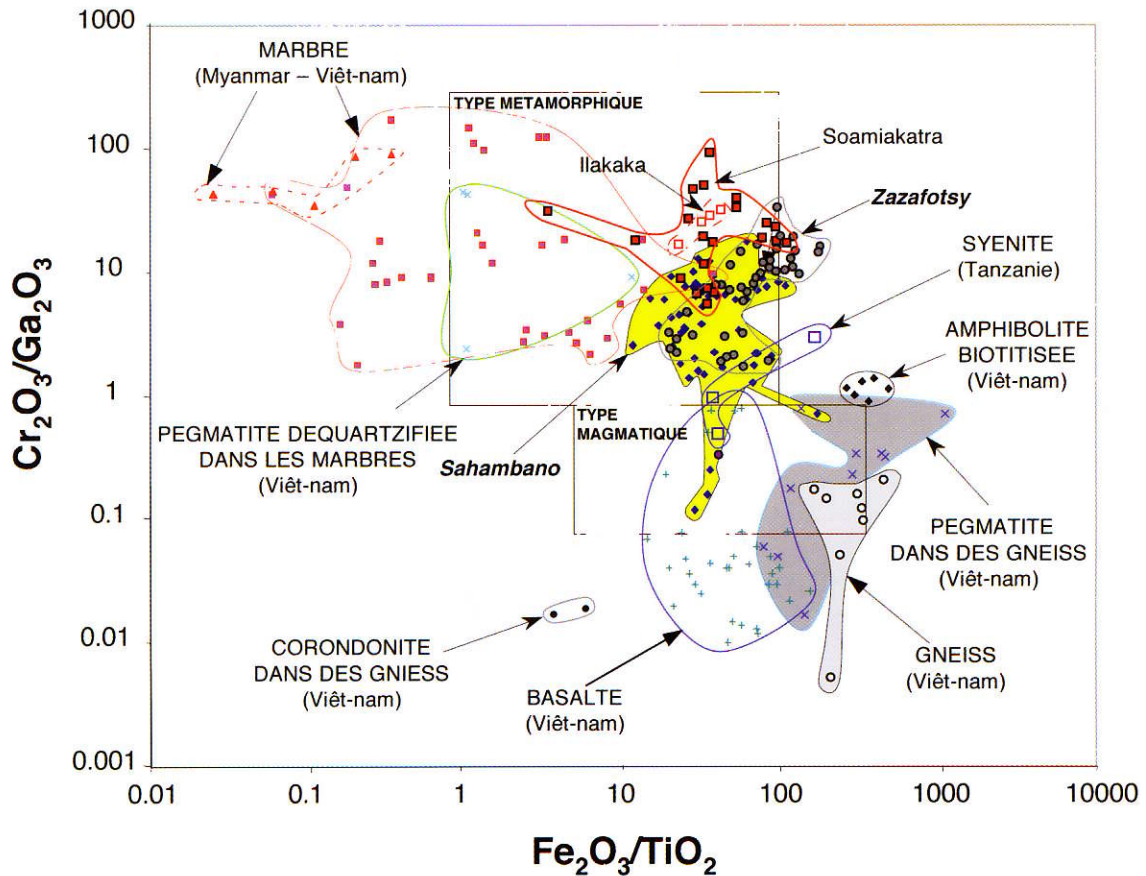


Figure 7 . Diagramme géochimique Fe_2O_3/TiO_2 en fonction de Cr_2O_3/Ga_2O_3 pour les saphirs de Sahambano et Zazafotsy, et les rubis des gisements de Soamiakatra et d'Ilakaka. Toutes les données géochimiques se retrouvent dans le domaine des corindons métamorphiques défini par Sutherland et al. (1998). Le domaine géochimique de saphirs et de rubis provenant de différents contextes géologiques du Viêt-nam sont de Pham Van et al. (2004), pour les syénites de Garba Tula en Tanzanie de Simonet et al. (2004)

par définition au saphir "padparadscha" (Notari, 1997) a une teneur en chrome comprise entre 780 et 1053 ppm. Les cristaux polychromes ne sont pas fréquents dans toute la production de saphirs de Sahambano. De tels cristaux sont zonés et le contact entre les différentes zones est soit progressif soit brutal. Quelques cristaux sont composites et ils se présentent sous la forme de prismes courts incolores chapeautés par un prisme long de couleur rosé où sont associés les faces du rhomboèdre (10.1) et du pinacoïde. Le contact entre les deux prismes hexagonaux est net ; le second prisme donne l'impression d'avoir poussé sur une plaque de germination formée par le premier cristal qui présente des traces de dissolution sur ses faces cristallines (Figure 3C). Quelques cristaux sont formés par un prisme hexagonal unique composé de zones de différentes couleurs (Figure 3D). La Figure 6 montre une section parallèle à l'axe c d'un tel cristal. La traversée réalisée à la microsonde électronique du cristal met en évidence une diminution du rapport Fe_2O_3/Cr_2O_3 en fonction de la teneur en MgO depuis une zone rose clair (zone 1) à une zone mauve clair (zone 2). Cependant entre les zones 2 et 3 (zone 3 = violet à bleu), la transition est brutale et marquée par un important front géochimique. La transition entre

les zones 4 et 5 c'est-à-dire du bleu à l'incolore, marque une discontinuité géochimique majeure, prouvant que la composition chimique du fluide a totalement changé avec un rapport élevé en Fe_2O_3/Cr_2O_3 et une forte teneur en MgO comme dans la zone 1. De tels phénomènes chimiques indiquent une circulation de fluides en plusieurs étapes avec la formation de fronts métasomatiques accompagnés parfois d'une dissolution hydrothermale partielle des faces des cristaux ainsi que d'une recristallisation sous des conditions P-T inchangées mais avec des variations du rapport Fe_2O_3/Cr_2O_3 . Dans les zones d'infiltration hydrothermale caractérisées par une intense micro-biotitisation développée à petite échelle et aboutissant à la formation de biotites, le rapport Fe_2O_3/Cr_2O_3 est élevé (compris entre 3 et 5), et ensuite dans la roche initiale infiltrée, il diminue jusqu'à 1,5 (pour la couleur fuchsia). La circulation de fluides métasomatiques a joué un rôle clé dans les échanges et le transfert d'éléments pour la formation des saphirs dans les schistes à biotite et dans les gneiss feldspathiques à saphirine biotitisés. Les compositions isotopiques de l'oxygène des saphirs sont homogènes et comprises entre 5.6 et 5.7‰ pour les cristaux du puits Momo et 6.5‰ pour ceux du puits Dominique (Tableau 1). La composition isotopique du saphir est tampon-

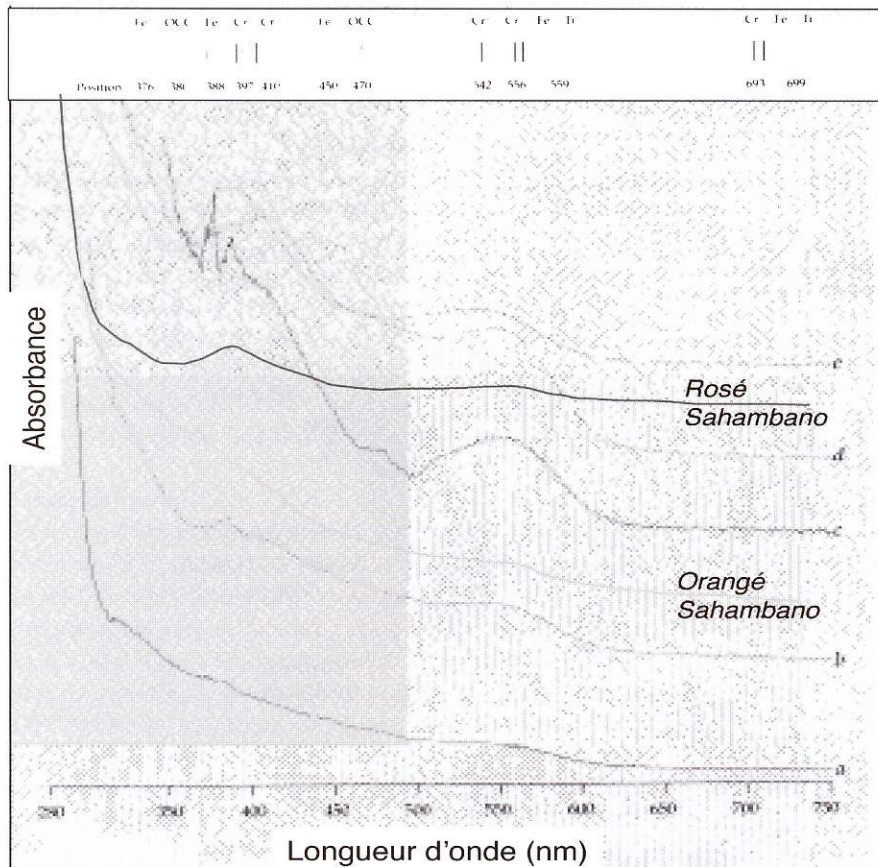


Figure 8 Spectres d'absorption obtenus sur les saphirs de couleur rosé et orangé de Sahambano. Ces deux spectres sont comparés avec ceux obtenus sur des saphirs "padparadscha" du Sri Lanka par Schmetzer et Schwarz (2004). Les spectres de a à e correspondent à une teneur croissante en chrome du saphir "padparadscha".

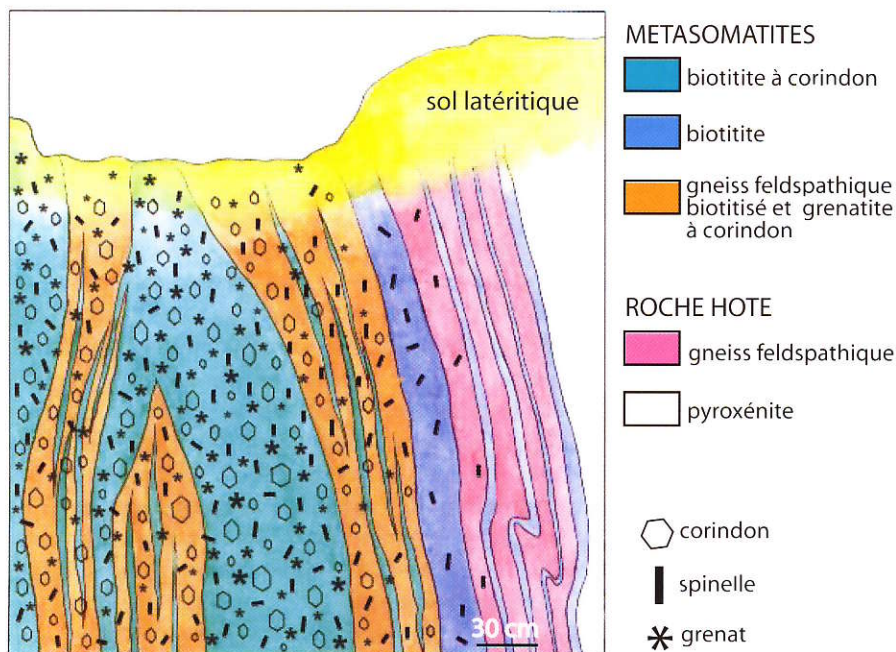


Figure 9 : Coupe géologique schématisée d'un puits du gisement de saphir de Zazafotsy (Andriamamonjy, 2006) montrant la distribution du saphir, du spinelle, du grenat dans la biotite et le gneiss feldspathique biotitisé

née par l'encaissant gneissique et il n'y a aucune variation isotopique en fonction de la couleur. Il s'agit d'un fluide unique qui a circulé plusieurs fois au cours du fonctionnement du système hydrothermal.

Le diagramme de corrélation Fe_2O_3/TiO_2 en fonction de Cr_2O_3/Ga_2O_3 pour les saphirs de Sahambano (Figure 7) montre qu'ils se projettent dans le domaine des corindons métamorphiques définis par Sutherland *et al.* (1998). Ils se caractérisent par des rapports Fe_2O_3/TiO_2 élevés (compris généralement entre 10 et 100) et des rapports Cr_2O_3/Ga_2O_3 compris entre 1 et 70.

Spectroscopie des saphirs

Les spectres d'absorption des saphirs se caractérisent par une augmentation continue de l'absorption du domaine du rouge (750 nm) au domaine du violet (350 nm). L'absorption est marquée au niveau du Cr^{3+} et du Fe^{3+} (Figure 8). Les saphirs rosés présentent un épaulement vers 556 nm et une absorption à 397 nm, caractéristiques des bandes d'absorption du Cr^{3+} . Les saphirs orangés présentent un épaulement vers 556 nm (Cr^{3+}) et un léger pic à 376 nm caractéristique d'une des bandes d'absorption du Fe^{3+} . Ces observations sont en accord avec le fait que lorsque l'on passe d'une couleur rosée à orange, le rapport Fe_2O_3/Cr_2O_3 du saphir augmente. Les spectres d'absorption des saphirs de Sahambano présentent certaines caractéristiques propres aux saphirs de type "padparadscha" sri lankais (Figure 8). Pour les saphirs sri lankais, la teneur croissante en chrome des saphirs (spectres a à e ; Schmetzer et Schwarz, 2004) se caractérise par une augmentation de l'intensité des pics et des bandes d'absorption de Cr^{3+} (556, 410 ou 397 nm). Cependant, pour les saphirs de couleur jaune-orangé (spectres c et e) les bandes d'absorptions liées au Fe^{3+} prédominent sur celles du Cr^{3+} . Pour les saphirs de couleur jaune, ces mêmes bandes d'absorption sont dues à la présence de centres colorés dans la structure cristalline du minéral.

Le saphir rose orangé de Sahambano bien que pierreuse et fracturé présente des caractéristiques qui peuvent répondre aux différents critères établis pour le saphir de type "padparadscha" (Notari, 1997) : la couleur (rose orangé), la chimie (présence de fer et chrome) et les spectres d'absorption (bandes d'absorption du Cr^{3+} et du Fe^{3+}). Il en diffère par l'absence de zones de colorations bleutées, la nature des inclusions solides, l'absence de centres colorés. Le "padparadscha" est une variété chromatique et non géographique de saphir (Notari, 1997). Le saphir de Sahambano ne correspond pas à l'habitus "original" et "antique" sri lankais. Il ne s'agit ni d'un habitus "induit" ou "traité", ni d'un habitus "fallacieux". En effet, les saphirs ne sont pas traités et l'étude au microscope électronique à balayage a mis en évidence la présence de diaspore dans les fractures mais pas d'oxydes de fer. Il s'agit d'un saphir rose orangé sans transparence et fracturé, caractérisé par des substitutions de Cr^{3+} et du Fe^{3+} avec Al^{3+} dans le site octaédrique et qui possède les caractéristiques d'absorption d'un cristal qui contient uniquement du fer et du chrome.

Le saphir de type "padparadscha", de couleur rose orangé, a été trouvé au Sri Lanka, en Tanzanie et à Madagascar. L'origine géologique de ces saphirs est pour la plupart inconnue. En effet, ils proviennent d'accumulations détritiques dans des placers comme à Ratnapura au Sri Lanka et à Umba en Tanzanie. Le seul gisement primaire connu est celui de Kalalani en Tanzanie (Seifert et Hysrl, 1999). Les saphirs se situent dans une pegmatite déquartzifiée contenue dans des serpentinites (riches en Mg, Fe et Cr). La roche hôte a subi une altération métasomatique alcaline qui a transformée la pegmatite en feldspathite à saphir (plumasite). A Sahambano, le protolithe est un gneiss feldspathique à saphirine (riche en Mg, Fe, Cr) qui a subi une altération métasomatique également alcaline. Par ailleurs, la composition isotopique de l'oxygène obtenue sur un saphir rose orangé provenant d'un placer sri lankais ($\delta^{18}\text{O} = 17.1\text{‰}$; Giuliani *et al.*, 2005) indique une roche hôte de type marbre identique aux marbres magnésiens à rubis d'Asie Centrale et du Sud-Est. Ainsi, il apparaît que les saphirs de couleur rose orangé se forment sur des roches hôtes magnésiennes contenant du fer et du chrome ou dans des environnements où le fer, le chrome et le magnésium sont mis en solution par des mécanismes de métasomatose alcaline par réaction de fluides sur deux protolithes à chimie contrastée e.g., une pegmatite et une roche ultramafique.

Le gisement de Zazafotsy

Le gisement de Zazafotsy, également appelé "Amboarohy" (Pezzotta, 2005), est situé à 35 km au nord de la ville d'Ihosy (Figure 1). L'indice à saphir a été découvert en 1950 et la première exploitation a débuté en 1989. L'extraction des saphirs

a été réalisée de façon sporadique jusqu'en 2003, époque de la mise à jour de magnifiques cristaux de saphirs enchâssés dans la gangue qui ont envahi les bourses minéralogiques européennes (Figure 3J). La majorité de ces saphirs n'est pas de qualité gemme et le traitement thermique semble nécessaire pour améliorer leur transparence et couleur.

Cadre géologique

Le gisement se localise dans le groupe Itremo formé principalement par des leptynites à grenat-sillimanite-cordiérite et des gneiss à amphibole et clinopyroxène avec quelques intercalations de quartzite et de cipolins. Il se trouve dans la zone de cisaillement de Zazafotsy qui a fonctionné au cours de l'événement tectono-métamorphique d'âge Panafricain (Martelat *et al.*, 2000). Un âge Ar-Ar de 494 ± 5 Ma a été obtenu sur une biotite associée à un saphir confirmant que la minéralisation est panafricaine.

Tout comme à Sahambano, la minéralisation se situe dans des lentilles de gneiss feldspathiques intercalées dans les leptynites à grenat qui ont été affectées par la circulation de fluides suivant des fractures concordantes à la foliation métamorphique (Andriamamonjy, 2006). La plupart de saphirs sont contenus dans des schistes à biotite ou biotites (Figure 3F, G).

La Figure 9 montre la coupe d'une lentille minéralisée (Andriamamonjy, 2006). La zone interne est formée de cristaux de grenat et de saphir pouvant atteindre 10 cm de long. Ils sont associés à de la biotite, du plagioclase, du spinelle et du feldspath potassique formés autour du saphir et du grenat (Figure 3J, K). La zone externe est un schiste à biotite avec saphir, spinelle et quelques cristaux de grandidiérite $[(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})\text{Al}_3(\text{BO}_3)(\text{SiO}_4)\text{O}_2]$ qui passe à un gneiss feldspathique biotitisé (Figure 3C). Dans une autre lentille, la zone externe se caractérise par une alternance de biotite et de tourmalinite noire sur une vingtaine de cm d'épaisseur. Enfin, une veine de pegmatite à apatite et béryl a été trouvée dans un des puits de l'exploitation ; les relations avec la minéralisation à saphir est à ce jour inconnue.

Minéralogie

Tous les cristaux de saphirs sont automorphes (Figure 3I). Ils présentent un habitus prismatique soit court, soit long c'est-à-dire une association du prisme hexagonal avec le rhomboèdre et le pinacoïde (Figure 3H). Les inclusions solides identifiées dans les saphirs sous le microscope électronique à balayage sont le zircon, le feldspath potassique, le plagioclase, la sillimanite, le spinelle et la biotite. Les saphirs ont différentes couleurs allant du bleu foncé, bleu clair, bleu gris, fuchsia, orange, rose, violet, au mauve et marron. Contrairement à Sahambano, des couleurs telles le jaune, le rose orangé, le vert à marron, le "vert de gris" ne se rencontrent pas.

Chimie des saphirs

Un total de 75 analyses dans 11 saphirs de couleurs différentes ont été réalisées à la microsonde électronique (Tableau 1). Les concentrations en éléments traces dans les saphirs sont comparables à celles publiées sur ce gisement par Caucia et

Boiocchi (2005). Les saphirs ont des teneurs en fer élevées (2320 ppm < Fe₂O₃ < 3300 ppm), variables en chrome en fonction de la couleur (300 ppm < Cr₂O₃ < 1890 ppm) et faibles à très faibles en titane, magnésium et gallium (moins de 220 ppm). La Figure 5B montre la distribution des couleurs en

Références

- Ackermann D, Windley B.F., Razafiniparany A. (1989) The Precambrian mobile belt of southern Madagascar. In : Daly J.S., Cliff R.A., Yardley B.W.D. (Eds.), *Evolution of metamorphic belts*, N°43, pp. 293-296.
- Andriamamonjy S.A. (2006) Les corindons associés aux roches métamorphiques du Sud-Ouest de Madagascar : le gisement de saphir de Zazafotsy, *Unpublished MSc Thesis, Antananarivo University, Madagascar*, 103 p.
- Besairie H. (1967) The Precambrian of Madagascar. In : Rankama, S. (Ed), *The Precambrian, Interscience, London*, pp. 133-142.
- Caucia F., Boiocchi M. (2005) Corindone. I cromofori nei cristalli policromi di Amboarohy, Ihosy, Madagascar. Risultati degli studi microanalitici, *Rivista Mineralogica Italiana*, N°2, pp. 126-129.
- De Wit M.J. (2003) Madagascar : Heads it's a continent tails it's an island. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, N°31, pp. 213-248.
- Giuliani G., Fallick A.E., Garnier V., France-Lanord Ch., Ohnenstetter D., Schwarz D., (2005). Oxygen isotope composition as a tracer for the origins of rubies and sapphires, *Geology*, N°33, Vol. 4, pp. 249-252.
- Kröner A. (1984) Late Precambrian plate tectonics and orogeny : a need to redefine the term Pan-African, *African Geology*, N°5, pp. 23-28.
- Lacroix A. (1941). Les gisements de phlogopites de Madagascar et les pyroxénites qui les renferment. *Annales Géologiques du Service des Mines, Imprimerie officielle, Tananarive*, fasc XI, pp. 27-37.
- Martelat J.E., Nicollet C., Lardeaux J.M., Rakotondrazafy R. (1997) Lithospheric tectonic structures developed under high-grade metamorphism in the Southern part of Madagascar. *Geodinamica Acta*, N°10, Vol.3, pp. 94-114.
- Martelat J.E., Lardeaux J.M., Nicollet C., Rakotondrazafy R. (2000) Strain pattern and late Precambrian deformation history in southern Madagascar. *Precambrian Research*, N°102, pp. 1-20.
- Moine B., Rakotondratsima C., Cuney M. (1985) Les pyroxénites à urano-thorianite du Sud-Est de Madagascar : conditions physico-chimiques de la métasomatose. *Bulletin de Minéralogie*, N°108, pp. 325-340.
- Nicollet C. (1990) Crustal evolution of the granulites of Madagascar. In : Vielzeuf D., Vidal Ph. (Eds.), *Granulites and crustal evolution, Dordrecht, Kluwer*, pp. 291-310.
- Notari F. (1997) Le saphir "Padapadradscha". *Revue de l'Association Française de Gemmologie*, N°132, pp. 24-27.
- Offant Y. (2005) Caractérisation pétrographique et minéralogique du gisement à saphir de Sahambano (Madagascar). *MSc Thesis University Paul Cézanne, Aix-en Provence, France*, 33 p.
- Pezzota F. (2005) Rubini e Zaffiri. Corindoni policromi di Amboarohy, Ihosy, Madagascar. *Rivista Mineralogica Italiana*, N°2, pp. 116-124.
- Pham Van L., Hoáng Quang V., Garnier V., Giuliani G., Ohnenstetter D., Lhomme T., Schwarz D., Fallick A.E., Dubessy J., Phan Trong T. (2004) Gem corundum deposits in Vietnam, *Journal of Gemmology*, N°29, Vol.3, pp. 129-147.
- Rakotondrazafy A.F.M., Moine B., Giuliani G., Razanatsheno M.O., Rakotosamizanany S., Schwarz D., Ravololomiandrinarivo B., Ralantoarison L.T., Andriamamonjy S.A. (2005) Gem corundum deposits in Madagascar. Salt Lake City Annual Meeting (October 16-19), *Geological Society of America with programs*, Vol. 37, N°7, pp. 499.
- Ralantoarison L.T. (2006) Les corindons associés aux roches métamorphiques du Sud de Madagascar : le gisement de saphirs de Sahambano (Sud-Est d'Ihosy). *Unpublished MSc Thesis, University of Antananarivo, Madagascar*, 100 p.
- Schmetzer K., Schwarz D. (2004) The causes of colour in untreated, heat treated and diffusion treated orange and pinkish-orange sapphires - a review, *Journal of Gemmology*, N°26, pp. 149-182.
- Seifert A.V., Hyrsl J. (1999) Sapphire and garnet from Kalalani, Tanga province, Tanzania. *Gems & Gemology*, Vol. 35, N°2, pp. 108-120.
- Simonet C., Paquette J.L., Pin C., Lasnier B., Fritsch E. (2004) The Dusi (Garba Tula) sapphire deposit, Central Kenya - a unique Pan-African corundum-bearing monzonite, *Journal of African Earth Sciences*, N°38, pp. 401-410.
- Sutherland F.L., Hoskin P.W.O., Fanning C.M., Coenraads R.R. (1998) Models of corundum origin from alkali basalt terrains : a reappraisal, *Contributions to Mineralogy and Petrology* N°133, pp. 356-372.

fonction de la teneur en Cr_2O_3 . La relation entre la composition chimique et la couleur est identique à celle décrite pour les saphirs de Sahambano : teneur élevée en Cr_2O_3 pour la couleur rose à orange à violet et fuchsia, teneur basse en Cr_2O_3 pour la couleur bleu et gris. La teneur moyenne en Fe_2O_3 est identique à celle définie pour les saphirs de Sahambano, c'est-à-dire environ de l'ordre de 3200 ppm.

Les saphirs polychromes montrent également la même évolution chimique que celle mise en évidence à Sahambano, avec l'existence d'une discontinuité entre une zone à saphir à dominante bleu et une zone à dominante rose et rouge. Par ailleurs, on retrouve les traces de dissolution hydrothermale et de recuit sur les faces cristallines matérialisées par la présence de surfaces polies.

Le diagramme de corrélation $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ en fonction de $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ (Figure 7) où sont reportés les paramètres chimiques des saphirs de Zazafotsy, montre qu'ils se situent dans le domaine métamorphique défini par Sutherland *et al.* (1998). Leur domaine géochimique recouvre celui des saphirs de Sahambano. Ils se caractérisent également par des rapports $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ élevés (compris entre 10 et 100) mais avec des rapports $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ plus élevés que ceux de Sahambano.

Conclusion

Les gisements de saphirs multicolores de Sahambano et de Zazafotsy se situent dans la domaine granulitique du Sud de Madagascar. Ils se sont formés durant l'orogénèse panafricaine

(vers 500 Ma). Il s'agit d'un nouveau type de gisement en domaine métamorphique résultant de l'interaction de fluides métasomatiques sur un gneiss feldspathique. Ils présentent aussi la particularité de posséder des saphirs multicolores couvrant une gamme de couleur très importante notamment le rose orangé à Sahambano. Ces deux gisements sont de type similaire au point de vue géologique et minéralogique. Cependant, la présence de gneiss à saphirine à Sahambano, source magnésienne, peut expliquer que la gamme de couleur rencontrée pour ce gisement est plus complète que celle définie à Zazafotsy. La teneur en chrome des saphirs est toujours inférieure à celle du fer et la variation de la couleur est fonction de la variation du rapport Fe/Cr pour une teneur en fer quasiment constante (~ 3200 ppm en Fe_2O_3).

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier pour leur appui logistique, financier ou analytique l'IRD (UR154 LMTG et la représentation de l'IRD à Madagascar), le CNRS (CRPG), l'Université d'Antananarivo (Département des Sciences de La Terre), le Programme de Gouvernance des Ressources Minérales (Ministère de l'Énergie et des Mines de la République de Madagascar) et le Service commun d'analyses de l'Université de Nancy I. Des remerciements particuliers à la Société Tany Hafa s.a qui a permis de réaliser cette étude sur le gisement de saphirs de Sahambano et à l'Association Française de Gemmologie qui a accepté de publier cette note. ■

B.A. ASSCHER s.a.

Pierres Précieuses de Couleur depuis 1860

Jean-Edouard
Desportes

Michel **Bruley**

62 rue La Fayette, 75009 Paris, FRANCE
Tél. 33 (0)1 47 70 78 29 • Fax. 33 (0)1 47 70 95 26
asscherprecious@laposte.net



Saphir de Ceylan 16,34 cts
Photo Michel Bruley