

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



ISSN 03 98 - 9011

Mars 2007 - N°159

**ASSOCIATION
FRANÇAISE
DE GEMMOLOGIE**

BUREAU

PRÉSIDENT

Didier GIARD

SECRÉTAIRE GÉNÉRAL

Erik GONTHIER

TRÉSORIÈRE

Dominique SIRAKIAN

**CONSEIL
D'ADMINISTRATION**

VICE-PRÉSIDENT DÉLÉGUÉ

Laurent GASCOU

TRÉSORIÈRE DÉLÉGUÉE

Jocelyne JONGET

Claire CARPENTIER

Myriam CHEREF

Carole GROUESY

Heja GARCIA GUILLERMINET

Annick GAULLIER

Gaston GUILIANI

Laurent MASSI

Frank NOTARI

Emmanuel PIAT

Philippe SCORDIA

**PRÉSIDENTS
HONORAIRES**

Michel MOREAU

Eric RUSKONÉ

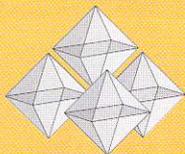
Henri-Jean SCHUBNEL

PRÉSIDENT-FONDATEUR

Daniel PIAT

PRÉSIDENTE D'HONNEUR

Dina LEVEL †



Association loi 1901

7, rue Cadet - 75009 PARIS

Téléphone : 01 42 46 78 46

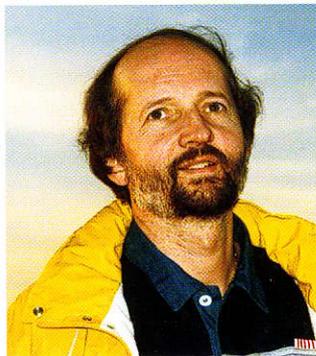
Télécopie : 01 40 22 09 77

Accueil - Communication

14 h à 17 h

Lysiane BORIOLI

gemmes7@wanadoo.fr



Pour les VIII^{es} Rendez-Vous Gemmologiques de Paris[®] organisés en collaboration avec la X^e Conférence Européenne des Pierres Précieuses, nous avons voulu offrir à nos lecteurs un numéro marquant qui puisse s'adresser aussi au plus grand nombre de professionnels.

Afin de promouvoir l'audience de la Revue sur le plan international, une grande partie de ce numéro est édité en français et en anglais.

Les gisements de corindons gemmes de Madagascar tout comme l'article inédit sur les gisements du Nigeria sont des contributions notables dans la connaissance des pierres précieuses.

En Joaillerie, l'accélération de la mondialisation tant sur le plan de la fabrication que de la consommation est si frappante, que nous avons souhaité créer une nouvelle rubrique s'efforçant d'expliquer les aspects les plus significatifs de ces évolutions.

Il n'est plus possible désormais de comprendre les marchés des gemmes sans y introduire les facteurs géopolitiques et géoéconomiques.

Ce thème prend une place majeure dans les VIII^{es} Rendez-Vous Gemmologiques de Paris[®].

Fidèle à son histoire, l'A.F.G. se veut être le point de croisement et de rassemblement de tous ceux qui par métier, vocation ou plaisir s'intéressent aux gemmes dans toute leur diversité.

Bien cordialement

Didier Giard



Les gisements de corindons gemmes de Madagascar

Gaston Giuliani^{1,2}, Daniel Ohnenstetter², Amos Fety Michel Rakotondrazafy³, Anthony E. Fallick⁴, Saholy Rakotosamizanany^{1,3}, Alfred Andriamamonjy³, Théogène Ralantoarison³, Madison Razanatsheho³, Christian Dunaigre⁵, Dietmar Schwarz⁵

EXTENDED ABSTRACT

For over ten years Madagascar has been a major gem-producing country (extraLapis, 1999). Corundum occurrences in Madagascar have been reported from different parts of the island (Lacroix, 1922a) and were exploited as refractory material (Besairie, 1966). Before 1993, only a few gem-corundum deposits were known in Madagascar in comparison with the main world producers. Since 1993, large amounts of gem-quality sapphires have been recovered from the Andranondambo metamorphic skarn-type deposit in the southern part of Madagascar (Rakotondrazafy, 1995) and from alluvial deposits linked to basaltic rocks in the northern part (Schwarz *et al.*, 2000). Most of the economic ruby arrived on the market at the end of 2000, from the secondary deposits of Andilamena and Vatomandry in the eastern part of the island (Schwarz and Schmetzer, 2001). The discovery in late 1998 of the first giant alluvial sapphire and ruby deposits in the Ilakaka area assured a long future for the recovery of large quantities of fine gemstones in Madagascar.

The primary deposits are divided in two groups: magmatic and metamorphic

Magmatic deposits consist of corundum-bearing syenite, pegmatite and alkali-basalt types. Sapphire and ruby-bearing syenites have been described from the Ambohitranefitra deposit in the Beforona region; sapphire in desilicated granites and feldspathised host-rock from the Anjomakely and Vatondrangy areas; and ruby in alkali-basalts from the Soamiakatra deposit in the Antsirabe-Antanifotsy area.

a- The Ambohitranefitra deposit, also known also as the Beforona syenitic occurrence, is located 20 km south of the city of Beforona (Fig. 1). Corundum was found in the alluvium of the Sahamaloto, Marofody and Tsarafosa rivers, and exploitation for refractory material started at the beginning of the twentieth century. The mineralised pebbles consisted of small centimetric ruby, pink or grey to blue "corundumite" (Fig. 2A) made of corundum and sillimanite with crystals of sapphires up to 15 cm, and syenite made

of disseminated red corundum (Fig. 2B) with K-feldspar, sillimanite and spinel. The primary deposit, a syenitic vein injected concordantly into a migmatitic biotite-graphite-bearing gneiss (Lacroix, 1922b), has been hidden by a landslide in the mid-XX century. The corundum-bearing syenite vein is fine-grained and is composed of biotite, microcline (48%), sillimanite (42%), corundum (4%), zircon and magnetite. The proportion of sillimanite is highly variable and some of the rocks are made of microcline, biotite and sapphire (Fig. 2C). Lacroix called this rock an "endomorphic syenite"; the rock is not a true magmatic syenite and retro-morphic textures characterized by the presence of K-feldspar corona around corundum are evidences of a metasomatic transformation of the initial rock (Fig. 2C).

b- In the south-east region of Antsirabe (Fig. 1), corundum-bearing desilicated granites and feldspathised micaschists were described in the Anjomakely occurrence by Lacroix (1922a). At the contact with the micaschists, the granite is desilicated. Quartz disappeared and the metasomatic rock is composed of microcline, sillimanite, biotite, zircon and magnetite. This new rock was called sillimanite-corundum-bearing syenite by Lacroix (1922a).

c- The deposit of Soamiakatra is located 35 km south of the Antanifotsy region (Fig. 1), which is the oldest area in the central part of Madagascar known for recovery of sapphire and ruby (Lacroix, 1922a). Since 1997, corundum has been extracted by pans from alluvium and soils, but prospection and mechanisation of operations has permitted the discovery of primary deposits (Fig. 3A). Ruby in Soamiakatra is found in pyroxenitic xenoliths hosted by Quaternary alkali basalts which intrude the graphitic gneisses and migmatites of the Ambatolampy and Tolongoina series. The clinopyroxenite contains aluminous-rich clinopyroxene, garnet (pyrope-almandine), plagioclase (bytownite-labrador), scapolite, corundum and amphibole (Fig. 3B). Ruby crystals are euhedral to anhedral with globular or tabular habits. They consist of millimetre to two centimetre sized crystals with pink to purplish blue to deep red colours. The corundum-garnet-clinopyroxene assemblage in the clinopyroxenite

¹ Institut de Recherche pour le Développement, DME, UR154 LMTG, Toulouse, France

² CRPG/CNRS, BP 20, 54501- Vandœuvre-lès-Nancy, France

³ Faculté des Sciences, Département des Sciences de La Terre, Université d'Antananarivo, Ambohitsaina, BP 906, Antananarivo 101, Madagascar

⁴ Scottish Universities Environmental Research Centre, East Kilbride, Rankine Avenue, Glasgow G75 0QF, Scotland, UK

⁵ Gübelin Gemmological Laboratory, Mähofstrasse, 102, CH-6000 Lucerne 9, Switzerland

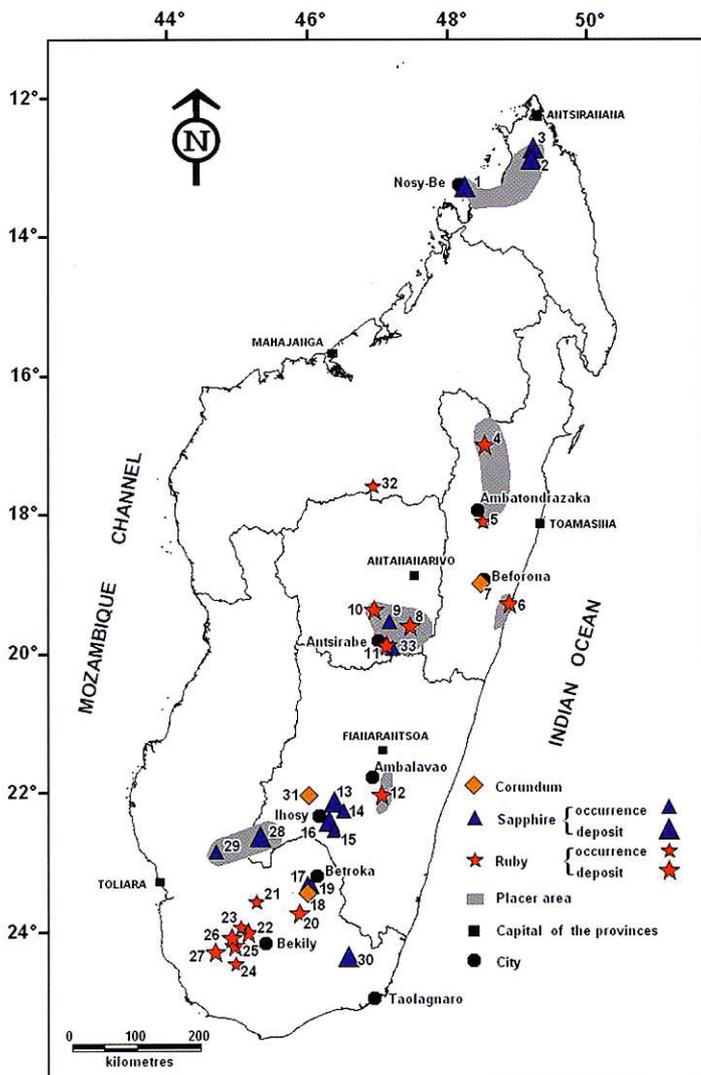


Figure 1 : Les gisements et indices de rubis, saphirs et corindons gemmes de Madagascar.

Figure 1: The sapphires, ruby and corundum occurrences and deposits from Madagascar.
 1: Nosy-Be, 2: Ambondromifely, 3: Anivorano, 4: Andilamena, 5: Didy, 6: Vatomaniry,
 7: Ambohitranefitra (Beforona), 8: Antsahanandriana, 9: Mandrosohasina, 10: Faratsiho,
 11: Soamiakatra, 12: Miarinarivo, 13: Zazafotsy, 14: Sakalalina, 15: Ambinda (Ihosy),
 16: Sahambano, 17: Ambinda (Betroka), 18: Vohidava (Voronkofotra), 19: Iankaroka,
 20: Ambatomena, 21: Ianapera, 22: Fotadrevo, 23: Anavoaha, 24: Maniry, 25: Gogogogo,
 26: Vohitany, 27: Ejeda, 28: Ilakaka, 29: Sakaraha, 30: Andranondambo, 31: Sakeny,
 32: Andriba, 33: Anjomakely.

gave a temperature of formation of ruby around 1100°C and a pressure about 20 kbar (Rakotosamizanany, 2003). Ruby formed in mafic and ultramafic rocks at the bottom of the lower crust and was later intruded and transported up to the surface by the alkali basalts.

Corundum deposits hosted in **metamorphic** rocks are located in the Precambrian granulitic domain of southern Madagascar (Fig. 1). The collision process between East and West Gondwana resulted in the formation of Neoproterozoic mobile belts (~650 Ma), mostly metamorphosed at high grade granulite metamorphism. The granulitic terranes are divided

in four major lithostratigraphic groups (de Wit, 2003) corresponding to the juxtaposition of tectonic blocks of different crustal levels (Martelat *et al.*, 2000). This patchwork is due to the relative movements of major ductile shear zones reflecting a crustal-scale strike slip system. Rocks in all blocks suffered a metamorphism around 750°C. The pressure shows an W-E decrease from 11 to 8 kbar in the west to 5 to 3 kbar in the east (Nicollet, 1990). Granitoids are abundant in the eastern part whereas anorthosites and metabasites are abundant in the west. Corundum deposits are found in the different tectonic blocks but strongly associated with the presence of major or minor shear zones. These structures acted as preferential fluid pathways and the parental rocks of corundum have suffered intense fluid-rock interaction resulting in huge metasomatic alteration. The nature of the parental host-rock varies from feldspathic gneisses (Zazafotsy and Sahambano deposits), cordierites (Iankaroka and Ambatomena), amphibolites and anorthosites (Ejeda, Fotadrevo, Vohitany and Gogogogo) to impure marbles (Tranomaro; Andranondambo deposit). The "sakenites" described by Lacroix (1941) are found in a metamorphic series formed of paragneiss with intercalations of amphibolites, clinopyroxenites and impure marbles (Sakeny, Vohidava, Ejeda-Anavoaha and Andranondambo occurrences) and consist of plagioclase veins or segregations with \pm spinel \pm corundum, \pm phlogopite and \pm hibonite.

a- Two new types of metamorphic gem corundum deposits are described for the first time in Madagascar (Ralantoarison *et al.*, 2006): sapphire in biotite schists (Fig. 3C, D, E) developed upon feldspathic gneisses (Sahambano and Zazafotsy deposits) and polychrome sapphire in cordierites intercalated within charnockites (Ambatomena (Fig. 3F) and Iankaroka deposits). Both types of deposit are within shear zones and corundum is linked to fluid circulation through fractures, foliation planes and lithological contacts.

b- The sapphire deposits in the Andranondambo area occur in the high-grade granulite facies of the Proterozoic Tranomaro group composed of metasedimentary rocks (metapelites, calc-silicates and marbles) interlayered with leucocratic gneisses (Rakotondrazafy *et al.*, 1996; Fig. 1). During metamorphism, marbles and calc-silicate gneisses have been transformed into skarns. They consist of impure calcitic marbles (Fig. 4F), diopsidites with variable amounts of scapolite, spinel, thorianite and pargasite, and peraluminous rocks made of plagioclase and/or scapolite with spinel, thorianite, hibonite (CaAl_2O_9) and/or blue to pink corundum (Fig. 4A, B and D). The clinopyroxenite often occurs at the contact between marble and granitic or charnockitic intrusions from the Anosyan magmatism. A metasomatic

origin is proposed for the skarns by Rakotondrazafy *et al.* (1996) and three stages of crystallisation have been defined:

- stage 1 of metasomatism (T ~ 850°C and P ~ 5 kbar): Ca-rich hyperaluminous segregations of meionite, spinel, thorianite and corundum formed in a titanite-bearing matrix consisting of scapolite and aluminous diopside.
- stage 2 of metasomatism (T ~ 800°C and P ~ 3-3.5 kbar): diopside was partially transformed into fluorine-rich pargasite and most calcite scapolites were transformed into anorthite + calcite. Thorianite crystallized with F-phlogopite, and hibonite formed at the expense of corundum and spinel (Fig. 4D).
- stage 3 under retrograde granulite metamorphism: at this late stage, blue gem sapphire formed in late K-feldspar veins crosscutting marbles, at T ~ 500°C and P ~ 2 kb. The veins are vertical with centimetre to decimetre width. Sapphire is associated with K-feldspar, F-apatite, calcite and phlogopite. At the border of the veins, marbles are feldspathized.

c- The term "sakenite" was defined by Lacroix (1941), after the discovery of this rock at Sakeny, located north of Ihosy (Fig. 1). It corresponds to a high grade granulitic metamorphic white- to greenish rock made of anorthite ± corundum ± spinel ± sapphirine ± phlogopite ± amphibole (edenite) ± clinopyroxene and ± zircon (Fig. 2F, G, I). Other occurrences were discovered in the granulitic domain of southern Madagascar including Vohidava, Anavoaha (Fig. 2E), and in the hibonite-thorianite-bearing skarns at Tranomaro (Bekinana, Fig. 4A).

These rocks are plagioclase composed of nearly pure anorthite which often presents coronitic texture due to the partial or complete replacement of corundum porphyroblasts by spinel (Fig. 2F, 4B), or spinel + hibonite, spinel + sapphirine, K-feldspar + spinel, anorthite + sapphirine. At Sakeny, "sakenites" display petrographic variations within a single bench, with locally predominance of one mineral species. Lacroix (1941) distinguished sapphirine, spinel, spinel + sapphirine-bearing "sakenites" (Fig. 2G, 2I) and sometimes "anorthitic corundumite" (anorthite + corundum) and "corundumite" (Fig. 2H).

The secondary deposits (placers) are exploited in volcanic and sedimentary environments

In basaltic provinces

a- The sapphire placer deposits in the Antsiranana province are located about 70 km south of Antsiranana city, in the Anivorano and Ambondromifehy area and on Nosy-Be

Island (Fig. 1). The area is mostly covered by 3,500 km² of volcanic rocks that date from the early Tertiary to the Quaternary. The 35-km-wide volcanic flows are formed by successive eruption of basalts, tuffs, pozzolanas and pyroclastites which contain enclaves mainly of peridotite. Recent prospecting and field work failed to locate any sapphire-bearing basalt flows in the Montagne d'Ambre volcanics. Nevertheless, Lacroix (1922a) noted the presence of a crystal of sapphire, zircon and spinel associated with hornblende and syenitic xenoliths in basaltic scoria at Lake Mahery from the Montagne d'Ambre, and one crystal at Nosy Mitsio Island which is constituted of basanite, phonolite and trachyte. Sapphire-bearing alluvial materials were deposited in voids and cracks of a karst developed on Jurassic Ankaratra limestone and arenites that lie south of the volcanic massif of the Montagne d'Ambre (Fig. 5A). All gem-bearing sediments forming paleoplacers (Fig. 5B, C) are cemented by secondary carbonates (deposits of Ambohangimamy, Maromikotra, Sanaderikely contained in limestones) or silica (deposit of Maventibao contained in arenites).

Two new sapphire deposits were discovered in 2001, i.e. on Nosy-Be Island and in the Andovokonko area on the Ambato Peninsula (Ramdohr and Milisenda 2004). At Befotaka, the "BGY-sapphires" and zircon are found in alluvial loess in a layer formed of basalt, pebbles located one meter above the granitic bed-rock. At Andovokonko, sapphire is found on the basalt surface covered by calcrete crust and in tidal flats.

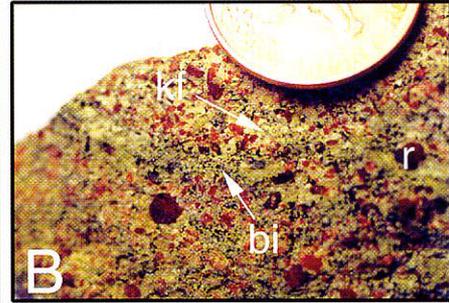
b- Alluvial corundum deposits in the south-eastern part of the Ankaratra volcanic massif were described by Lacroix (1922a). Gem corundum was extracted at different localities: ruby at Andranomadio, ruby and sapphire at Andriankely, and blue, green and yellow sapphires at Ampitatafika, Vohimena, Ambatotsipihana, Maroparasy, Sambaina, Ambohimandroso, Iankiana, Vontovorona, Mahanoro, Faratsiho, Vakinakaratra and Belambo. Nowadays, recent alluvial placers in river and soils are mined by local miners. The "BGY sapphire" deposits of Kianjanakanga-Mandrosohasina and the ruby deposit of Antsabotraka are mined from sedimentary deposits made of basaltic and phonolitic pebbles cemented by lateritic soils.

c- New deposits found in 2000 in the area of Vatomaniry and Andilamena (Fig. 1) drastically changed ruby production in Madagascar:

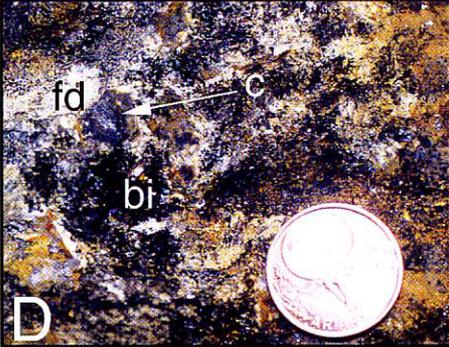
- The alluvial deposits of the Vatomaniry area (Amfao, Ambodilalona) contained rubies and green, transparent to

Figure 2 : Les gisements de corindons métamorphiques de Madagascar. Collection Lacroix (MNHN).
 Figure 2: The metamorphic corundum deposits of Madagascar. Lacroix collection (MNHN).

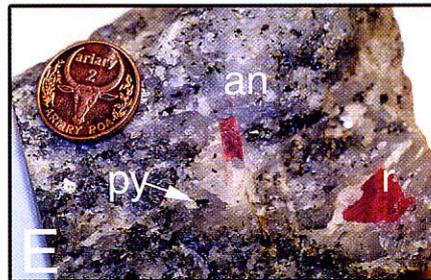
A - "Corindonite" d'Antohidrano, près de Sahomaloto (région de Beforana). o : oxydes de fer; c: corindon massif gris.
 "Corundumite" from Antohidrano, near Sahomaloto (Beforana area). o: iron oxides; c: grey corundum.



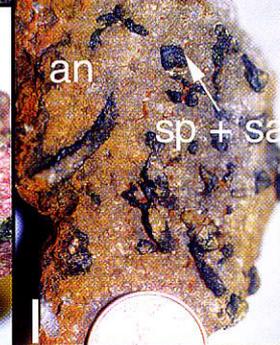
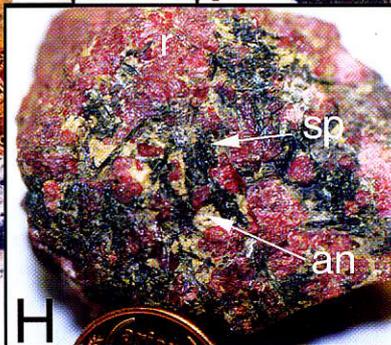
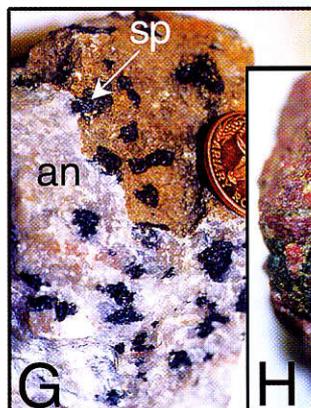
B - "Syénite" à rubis d'Ambohitraneftira (Ambafotsy, région de Beforana). Rubis (r) disséminé dans une matrice composée de feldspath potassique (kf) et biotite (bi).
 Ruby-bearing "syenite" from the Ambohitraneftira (Ambafotsy, Beforana area). Ruby (r) is disseminated in a matrix composed of K-feldspar (kf) and biotite (bi).



C - Le gisement d'Ambohitraneftira. Textures de rétromorphose avec le développement d'une couronne de feldspath potassique (kf) autour du corindon (c). La matrice est formée de biotite (bi) et de feldspath potassique.
 The Ambohitraneftira deposit. Retromorphic textures showing the formation of K-feldspar corona (kf) around corundum (c). The matrix is made of biotite (bi) and K-feldspar.



D - L'indice à saphir d'Anjomakely. Saphir gris bleu à violacé (c) dans un micaschiste à biotite (bi) et feldspath potassique (fd).
 The Anjomakely sapphire occurrence. Grey-blue to purplish-blue sapphire (c) in a micaschist of biotite (bi) and K-feldspar (fd).



E - La "sakénite" d'Anavoaha dans la région de Bekily. Le rubis (r) est disséminé dans une matrice à anorthite (an) et pyroxène vert (py).
 The Anavoaha "sakenite" in the Bekily area. Ruby (r) is disseminated in a matrix composed of anorthite (an) and green pyroxene (py).

F - La "corindonite" de Sakeny (région d'Ihosy). Le corindon possède une couronne de rétromorphose à spinelle (sp) et saphirine (sa).
 The corundumite of Sakeny (Ihosy area). A corundum crystal (c) showing a retromorphic texture characterized by a corona of spinel (sp) and sapphirine (sa).

G - Une "sakénite" de Sakeny à anorthite (an) et spinelle (sp).
 A "sakenite" from Sakeny composed of anorthite (an) and spinel (sp).

H - Aspect d'une "corindonite" de la région d'Ihosy. La roche contient du rubis (r), du spinelle (sp) et de l'anorthite (an).
 Aspect of a "corundumite" from the Ihosy area. The rock contains ruby (r), spinel (sp) and anorthite (an).

I - Une "sakénite" de Sakeny (région d'Ihosy). Les cristaux de spinelle et de saphirine (sp + sa) sont disséminés dans une matrice à anorthite (an).
 A "sakenite" from Sakeny (Ihosy area). The crystals of spinel and sapphirine (sp + sa) are disseminated in a matrix of anorthite (an).

yellow and some blue sapphires accumulated in fans of the lower part of the rivers. The source of these corundum are paleoplacers found in the upper part of the alluvial basin. The paleoplacer contains pebbles of basalt, granite and pegmatite with rounded crystals of magnetite, orange to red zircons, gem corundum and other heavy minerals, cemented by a siliceous matrix.

Andilamena is a huge ruby-bearing placer deposit but there is no detailed geological information about the mining areas and the nature of the ruby and sapphire host rock is unknown.

In sedimentary provinces: the giant placer of Ilakaka (Isalo area)

The Ilakaka mining district is located in the Isalo massif, between the cities of Sakaraha and Ilakaka (Fig. 1). Other districts are found north of Ilakaka and near Bezaha, 120 km southwest of Ilakaka. The alluvial giant deposit was discovered in late 1998 on the border of Route National 7 and the rush of locals and immigrant miners resulted in the discovery of several mining zones between Ilakaka and Sakaraha, including Sakalama, Ampasimamitaka, Vohimena, Bekily and Manombo Vaovao (Fig. 5D). The deposits are generally exploited by illegal miners using 1-m diameter shafts reaching up to 20 m deep with windlass systems, washing gravels in pans and removing the stones from the sieves by hand. The deposits are sometimes exploited in open pits following benches to reach the gem pebble zones (Fig. 5E). In summer 2000, only two legal operators were working with classical washing plants (Garnier *et al.*, 2004). In 2002, test mining analysis by the Gem Mining Resources company during 38 days of production realised approximately 43 kilos of gemstones, comprised 4% of semi-precious stones (alexandrite, topaz and cat's eye chrysoberyl), volcanic glasses, and rubies, and 96% of sapphires with 58% of pink sapphires, 30% of blue sapphires, and 8% of other coloured sapphires (yellow, padparadscha, green; Fig. 5F). The operators exploit the alluvial terraces of the Ilakaka and Benahy rivers which lie on the Isalo sandstones. The terraces resulted from the erosion and stripping of the Triassic sandstones. They are not well consolidated and are composed of quartziferous sands which contain pebbles of ferruginous sandstone (laterite), rounded blocks of Isalo sandstone and quartz, quartzite and schist pebbles (Garnier *et al.*, 2004). On the Benahy river, three levels of gemmiferous terraces are found (Fig. 1). The bottom terrace is the richest in gemstones with concentration reaching up to 5 to 7 g/m³ for the mechanized exploitations. The concentration in some terraces exploited by washing and hand-recovery reached about ten g/m³. They correspond to deep pot holes or sinuous meanders which are not accessible for mechanical

exploitation. River sands, sampled in the stream bed, contain between 0.2 and 2.1 g/m³ of sapphire. This alluvial concentration results from the erosion of old terraces.

Résumé

Les gisements de corindons gemmes de Madagascar se sont formés à différentes époques géologiques et dans différents environnements : (1) dans le socle Précambrien et les terrains Néoprotérozoïques du sud de Madagascar, et dans les formations volcano-sédimentaires de Beforona, au nord-est d'Antananarivo. Dans le Sud, les terrains métamorphiques appartiennent au faciès granulite (700 < T < 800°C et 4 < P < 5 kbar) et les gisements de corindons se sont formés durant l'orogénèse Panafricaine (565 à 490 Ma). Ils sont associés à des complexes mafiques et ultramafiques (gisements de rubis du Vohibory), des skarns développés au contact des granites Anosyens et le groupe Tranomaro (gisement de saphirs bleus du district Tranomaro-Andranondambo), dans des couloirs de zones de cisaillements recoupant des gneiss feldspathiques (gisements de Sahambano et Zazafotsy), des cordiérites (Iankaroka, Ambatomena), des pyroxénites (séries de Tranomaro, Vohimena et de l'Androyen). La circulation des fluides le long des discontinuités lithologiques et structurales a provoqué la transformation in situ des roches hôtes des corindons (pegmatites déquartzifiées, "sakénites" et "corindonites"). Dans les formations Protérozoïques de Beforona, les saphirs et rubis sont contenus dans des "syénites" ; (2) dans les formations sédimentaires triasiques des grès de l'Isalo avec les placers géants de la région d'Ilakaka-Sakaraha. Les sources des saphirs bleus et colorés, et des rubis rencontrés dans les terrasses anciennes est débattue mais une contribution des gisements situés dans le socle granulitique du Sud est fort probable ; (3) dans les basaltes alcalins du Néogène et Quaternaire de la Montagne de l'Ankaratra (région d'Antsirabe-Antanifotsy) et de la Province d'Ambohitra et de la Montagne d'Ambre (saphirs bleu-vert-jaune de Nosy Be, Ambato, Anbondromifehy et Anivorano). Les gisements primaires sont rares, et le site à rubis de Soamiakatra près d'Antanifotsy est unique. Les xénocristaux de rubis sont contenus dans des xénolithes de pyroxénites inclus dans les basaltes alcalins ; (4) dans les placers alluvionnaires actuels ou d'âge inconnu pour les rubis gemmes d'Andilamena et de Vatomaniry, respectivement au nord et à l'est d'Antananarivo.

Mots-clés

Madagascar, rubis, saphir, gisements, magmatique, métamorphique, placers, basaltes, grès.

Introduction

Madagascar est un paradis minéral pour les minéraux et les gemmes (ExtraLapis, 1999). De nos jours, ce pays est devenu un important producteur de pierres précieuses notamment d'émeraude, de rubis et saphirs. La plupart des pierres fines qui ont assis la réputation de la Grande Ile proviennent des pegmatites avec l'héliodore, l'aigue-marine, les tourmalines polychromes, la kunzite, la morganite, l'orthoclase jaune et l'amazonite. Des pierres colorées de valeurs minéralogique et commerciale ont été trouvées récemment, en particulier les grenats (almandin, rhodolite et spessartite), la londonite, et la pezzotaite, et ainsi que des minéraux rares comme la grandidiérite et la kornéropine décrits au siècle dernier (Lacroix, 1922a).

Des indices à corindons ont été répertoriés dans différentes parties de l'île (Lacroix, 1922a) et certains gisements ont été exploités comme matériel réfractaire (Besairie, 1966). En 1992, Salerno décrivait les saphirs polychromes de Iankaroka, au sud-ouest de Betroka, dans la province de Tuléar. Depuis 1993, une grande quantité de saphirs gemmes ont été extraits des carrières d'Andranondambo dans la partie sud de Madagascar (Rakotondrzafy, 1995) et dans les placers associés à la province basaltique de la région d'Antsiranana (Schwarz *et al.*, 2000). La plupart des rubis gemmes des placers d'Andilamena et de Vatomaniry arrivèrent sur le marché vers la fin 2000 (Schwarz et Schmetzer, 2001). La découverte vers la fin 1998 des placers géants de la région d'Ialakaka assura la production d'une grande quantité de pierre fines et précieuses.

Depuis les trois tomes du livre de Lacroix "Minéralogie de Madagascar", publiés en 1922, aucune synthèse géologique et minéralogique n'a été réalisée sur les différents types de gisements de corindons de la Grande Ile. Les études géologiques et/ou gemmologiques se focalisèrent sur certains gisements, notamment les saphirs d'Andranondambo, les rubis d'Ejeda-Fotadrevo et les saphirs d'Ambondromifehy-Nosy Be dans la région d'Antsiranana. La présente note se propose de réaliser une synthèse des différents types de gisements de corindons gemmes ou industriels de Madagascar à partir d'une revue bibliographique et une synthèse des études géologiques réalisées depuis 2004 par l'IRD, le CNRS et l'Université d'Antananarivo.

Les gisements primaires de corindons à Madagascar

Les roches précambriennes occupent les deux tiers est de Madagascar alors que le tiers situé à l'ouest est formé de roches sédimentaires du Paléozoïque au Quaternaire et de roches volcaniques du Cénozoïque au Néogène. Les gise-

ments de corindons se trouvent presque exclusivement dans le Précambrien. Les gisements primaires appartiennent à deux types : (i) **magmatique**, associés à des "syénites", des pegmatites et des xénolithes de clinopyroxénites en enclaves dans des basaltes alcalins ; (ii) **métamorphique**, et/ou associés à la métasomatose alcaline qui s'est développée lors de l'interaction de fluides sur différentes roches précambriennes (gneiss, roches mafiques et ultramafiques, marbres et roches calco-silicatées, cordiérite). Les gisements secondaires sont d'origine détritique. Trois types de gisements peuvent être séparés suivant leur environnement géologique (i) sédimentaire avec les paléoplacers des formations triassiques de l'Isalo, (iii) **volcanique** avec les placers de l'Ankaratra sur le plateau central, la Montagne d'Ambre dans la province volcanique du Nord, et de la région de Vatomaniry sur la bordure Nord-est, et enfin (iii) d'origine inconnue pour le gisement d'Andilamena.

Les gisements magmatiques

a- Le gisement d'Ambohitraneftira connu également sous le nom de syénite de Beforona, est situé à 20 km au sud de la ville de Beforona (Fig. 1). Les corindons furent trouvés dans les alluvions des rivières Sahamaloto, Marofody et Tsarafosa, et exploités par l'industrie dans le début du XX^e siècle (Lacroix, 1922a). En 20 ans, la production atteignit 3000 tonnes de corindons et seulement 20 tonnes par années furent extraites jusqu'en 1927 ; la teneur était de 40 kg/m³ (Duclos, 1927). Les galets à corindons étaient soit des "corindonites", c'est-à-dire des roches monominérales composées de cristaux centimétriques de rubis ou de saphirs bleus, gris ou rosés (Fig. 2A), soit des "syénites" à rubis (Fig. 2B) contenant du feldspath potassique, de la sillimanite et du spinelle. Le gisement primaire correspondait à un filon de "syénite" injecté dans un gneiss migmatitique à biotite et graphite (Lacroix, 1922b). Ce gisement a été enseveli par un éboulement au milieu du XX^e siècle. La "syénite" décrite par Lacroix (1922b) est composée de biotite, microcline (48%), sillimanite (42%), corindon (4%), zircon et magnétite. La proportion de sillimanite est très variable et certains échantillons en sont dépourvus (Fig. 2C). Lacroix appela cette roche une "syénite endomorphique" ; l'étude pétrographique des échantillons de la collection Lacroix du Muséum d'Histoire Naturelle de Paris (MNHN), montre que la roche n'est pas une syénite magmatique. Les textures de rétro-morphose marquées par le développement de couronnes de feldspath potassique autour du corindon indiquent une transformation métasomatique de la roche initiale (Fig. 2C). Par ailleurs, la cristallisation de rubis semble être liée à une interaction fluide-roche avec une roche mafique. Les cristaux de corindons

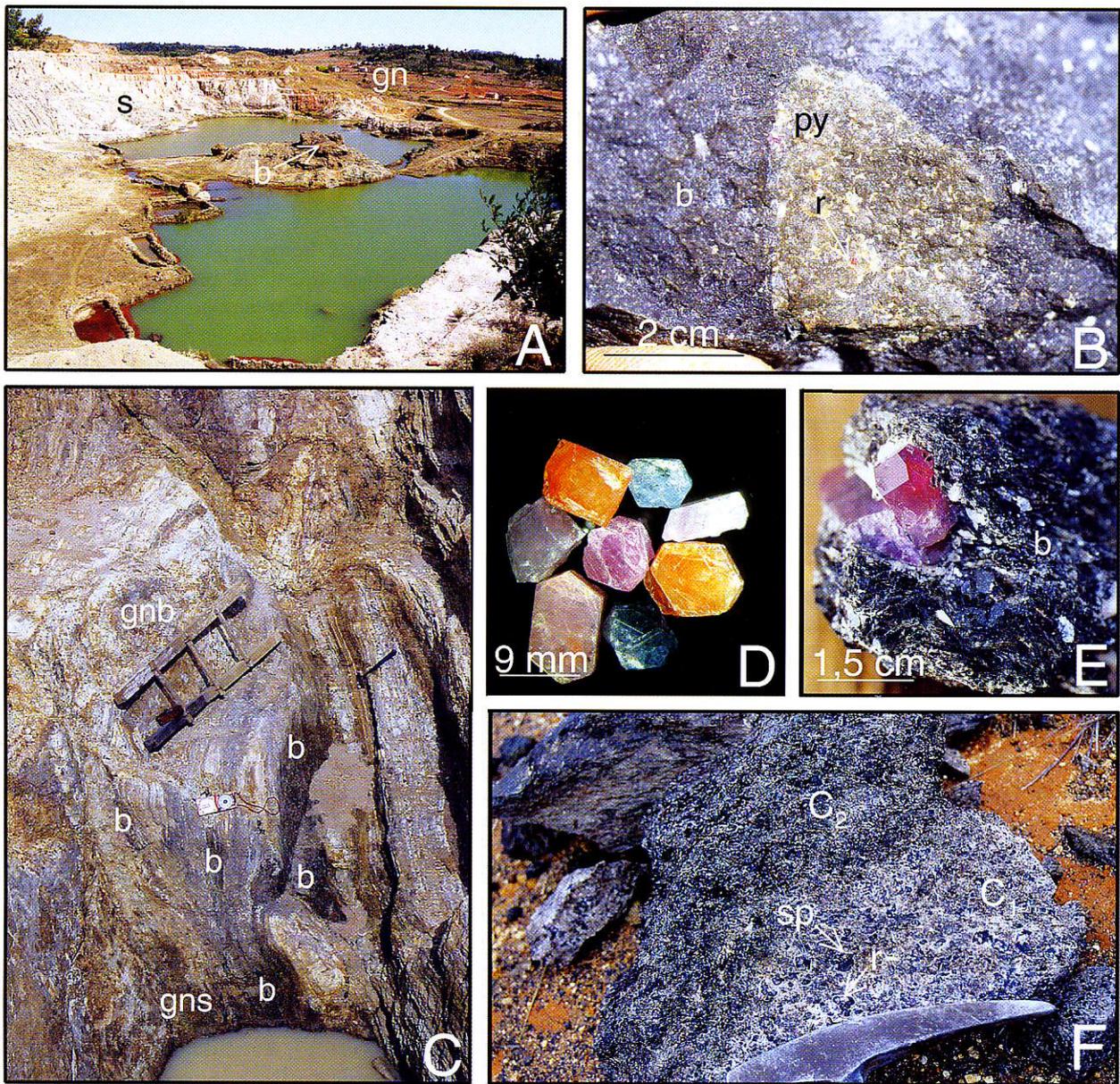


Figure 3 : Les gisements primaires de corindons gemmes de Madagascar.

Figure 3: The primary gem-corundum deposits of Madagascar.

A - Vue panoramique de la mine de rubis de Soamiakatra en 2003. Le gisement est situé dans un dyke de basalte alcalin qui recoupe des khondalites, des gneiss à biotite et des quartzites (gn). La partie superficielle du basalte altérée par les eaux météoriques a été exploitée (sols blancs, s) et les parties dures du basalte s'observent dans la partie basse de la carrière (b).

General view of the Soamiakatra ruby mine in 2003. The deposit is located in an alkali basalt plug intruding khondalite, biotite gneiss and quartzite (gn). The superficial weathered portion of the basalt was exploited (white soils, s) and remnants of fresh portion of the basalt are visible in the bottom part of the pit (b).

B - Xénolithe à rubis du basalte alcalin de Soamiakatra (b). Il s'agit d'une pyroxénite (py) à anorthite et clinopyroxène. Le rubis (r) mesure deux millimètres sur la photo.

Typical ruby-bearing pyroxenite xenolith of the Soamiakatra alkali basalt (b). The two-millimeter-sized pink ruby (r) is contained in the pyroxenite (py).

C - Le gisement de saphirs colorés de Sahambano (tranchée Momo, région d'Ihosy). Les biotites à saphirs (b) se développent suivant des fractures qui recoupent des gneiss feldspathiques à biotite, grenat et sillimanite (gnb) et à sapphirine (gns). The colored sapphire deposit of Sahambano (Momo pit, Ihosy area). The biotite schists (b) are formed along fractures that affected biotite-garnet-sillimanite-bearing feldspathic gneisses (gnb) and sapphirine-bearing gneisses (gns).

D - Les saphirs colorés du gisement de Sahambano
Fancy sapphires from the Sahambano deposit.

E - Saphirs roses contenus dans une gangue de biotite (b) (gisement de Zazafotsy, NE d'Ihosy).

Pink sapphires contained in a biotite (b) (Zazafotsy deposit, NE of Ihosy).

F - La cordiérite à rubis du gisement d'Ambatomena (Nord de Isoanala). Les rubis (r) sont contenus dans une roche métasomatique à cordiérite-sapphirine-anorthite ± phlogopite ± feldspath potassique (C₁), formée au contact d'une roche à cordiérite-sapphirine-phlogopite (C₂). Les rubis présentent une texture en couronne constituée de spinelle et de sapphirine, le spinelle (sp) pouvant substituer totalement les cristaux de rubis.

The ruby-bearing cordierite of the Ambatomena deposit (North of Isoanala). Ruby crystals (r) are contained in a cordierite-sapphirine-anorthite ± phlogopite ± K-feldspar-bearing metasomatic rock (C₁) developed at the contact of a cordierite-sapphirine-phlogopite rock (C₂). Ruby presents a coronitic texture made of spinel and sapphirine with sometimes a complete substitution of the corundum crystal by spinel (sp).

ont une taille comprise entre 1 et 8 cm. Ils sont automorphes et ils présentent la forme en barillet avec la dipyramide hexagonale w associée au pinacoïde c et au rhomboèdre r , ou avec la dipyramide hexagonale w allongée suivant l'axe c ou aplatie suivant le pinacoïde (Lacroix, 1922a).

- b- Dans le sud-est de la région d'Antsirabe à Anjomakely (Fig. 1), des indices de granites déquartzifiés et de mica-chistes feldspathisés à corindon furent décrits par Lacroix (1922a). Le quartz est dissous et la roche métasomatique est composée de microcline, sillimanite, biotite, zircon et magnétite. Cette nouvelle roche est appelée "syénite" à sillimanite et corindon par Lacroix (1922a). La taille des cristaux de saphir varie du cm au dm, et la couleur dominante est gris bleuté avec des nuances de rose. Le schiste adjacent au granite, composé de feldspath potassique, biotite et corindon (Fig. 2D), est appelé micaschiste à corindon par Lacroix (1922a). D'autres indices de micaschistes à corindon avec ou sans relation avec un granite ou une pegmatite sont décrits dans la même région à Ankazondrano, Ambatomitety, Bilisy, Ambohimanarivo, Ambohimilemaka, Vatondrangy and Rafanjaka. Ces micaschistes contiennent de la sillimanite et de la muscovite enveloppées par de grandes lamelles de biotite. D'autres indices sont décrits au nord (Tsinjoarivo) et à l'ouest de la ville d'Antsirabe (Rafanjaka, Belanitra, Vohitrakanga and Antandrokomby) ; ils furent la première source de corindon industriel à Madagascar (Lacroix, 1922a). De tels gisements n'ont pas encore fait l'objet d'études détaillées mais une origine métasomatique du corindon est fort probable.
- c- Le gisement de Soamiakatra est situé à 35 km au sud de la ville d'Antanifotsy (Fig. 1), qui fut la région pionnière de Madagascar pour l'exploitation du rubis et du saphir (Lacroix, 1922a). Jusqu'en 1997, le corindon était récupéré à la batée dans les alluvions et les sols. La prospection et la mécanisation a permis de trouver et d'exploiter des gisements primaires (Fig. 3A). Le rubis à Soamiakatra est associé à des xénolithes de clinopyroxénite à grenat contenus dans des basaltes alcalins quaternaires qui recoupèrent les gneiss graphiteux et les migmatites d'Ambatolampy et Tolongoina (Rakotosamizany, 2003). La clinopyroxénite contient un diopside alumineux, du grenat (pyrope-almandin), du plagioclase (bytownite-labrador), la scapolite, l'amphibole et le corindon (Fig. 3B). Les cristaux de rubis ont une taille variant du millimètre à deux centimètres et une couleur allant du rose au violet jusqu'au rouge. Les inclusions solides sont la phlogopite, le rutile avec des exolutions d'ilménite, le zircon, l'albite, le diopside, le grenat et le spinelle chromifère.

L'assemblage rubis-clinopyroxène-grenat indique une température de formation pour le rubis d'environ 1100°C et une pression de 20 kbar (Rakotosamizany, 2003). Le rubis s'est formé dans des roches mafiques à la base de la croûte lithosphérique qui furent recoupées postérieurement et transportées à la surface par les basaltes alcalins intra-plaques.

Les gisements métamorphiques

Les gisements de corindons métamorphiques se situent dans le domaine granulitique d'âge Précambrien du sud de Madagascar (Ralantoarison *et al.*, 2006). Les terrains granulitiques sont divisés en quatre groupes lithostratigraphiques qui correspondent à la juxtaposition de blocs tectoniques de différents niveaux crustaux (Martelat *et al.*, 2000). Le découpage tectonique est souligné par des zones de cisaillement majeures qui affectent la croûte continentale. La température du métamorphisme est d'environ 750°C dans tous les blocs mais la pression varie de 11 à 8 kbar à l'ouest, et de 5 à 3 kbar à l'est (Nicollet, 1990). Les gisements se rencontrent dans tous les blocs mais ceux à rubis sont plus fréquents à l'ouest où ils sont associés à des roches basiques et des anorthosites. Les gisements de corindons sont généralement associés aux zones de cisaillement, lesquelles ont servi de drain pour la circulation des fluides et le développement d'importantes altérations métasomatiques. La nature des roches hôtes des corindons gemmes varie depuis des amphibolites et des anorthosites (gisements de Ejeda, Fotadrevy, Vohitany and Gogogogo), cordiérites (Iankaroka and Ambatomena), des gneiss feldspathiques (Zazafotsy and Sahambano) jusqu'à des marbres et des cipolins (skarns d'Andranondambo). Les "sakénites" à corindons décrites par Lacroix (1941) sont des roches métasomatiques feldspathiques (plagioclasites) qui forment des filons ou des ségrégations à anorthite, corindon pierreux, spinelle, phlogopite et hibonite.

a- Les gisements dans les gneiss feldspathiques

a1/ Le gisement de saphirs multicolores de Sahambano. Ce gisement a fait l'objet d'une description détaillée dans le numéro 158 de la Revue de Gemmologie de l'AFG (Ralantoarison *et al.*, 2006). Il se situe à 30 km à l'Est de la ville d'Ihoso (Fig. 1). Découvert en 1999, il est exploité par la société Tany Hafa S.A. Les cristaux de saphirs sont multicolores parfois polychromes mais rarement de qualité gemme (Fig. 3D) : 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.

Ce gisement se trouve dans la zone de cisaillement de Ranotsara qui a été le siège d'une déformation ductile importante entre 600 et 500 Ma. Les saphirs sont 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 la circulation de fluides métasomatiques. L'interaction fluide roche a provoqué une biotitisation des gneiss feldspathiques (Fig. 3C). Les saphirs se trouvent dans des biotites 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 ~ 650°C et une pression ~ 5 kbar (Ralantoarison, 2006).

a2/ Le gisement de saphir de Zazafotsy est également connu sous le nom de "Amboarohy" (Pezzotta, 2005) et est situé à 35 km au nord de la ville d'Ihoso (Fig. 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. La majorité de ces saphirs n'est pas de qualité gemme et le traitement thermique semble nécessaire pour améliorer leur transparence et couleur.

Le gisement 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 des leptynites à grenat qui ont été affectées par la circulation de fluides suivant des fractures concordantes à la foliation métamorphique (Andriamamonjy, 2006). La plupart des saphirs sont contenus dans des schistes à biotite ou biotites (Fig. 3E).

Les cristaux de saphirs qui peuvent atteindre 10 cm de long sont associés à de la biotite, du plagioclase, du spinelle et du feldspath potassique formés autour du saphir et du grenat (Ralantoarison *et al.*, 2006). Les saphirs ont différentes couleurs allant du bleu foncé, bleu clair, bleu gris, fuchsia, orange, rose, violet, au mauve et marron. Contrairement à Sahambano, les saphirs de couleur jaune, rose orangé, vert à marron, "vert de gris" ne se rencontrent pas.

b- Les gisements dans les cordiérites

b1/ Le gisement de saphirs polychromes de Iankaroka. L'existence de cet indice a été signalé en 1984-85 et le site a été décrit par Salerno en 1992. Il se situe à 35 km au sud

de la ville de Betroka (Fig. 1), dans la province de Tuléar. Les saphirs sont contenus dans une cordiérite d'approximativement 7 m de long et 4 m de large, intercalée dans des leptynites à biotite et cordiérite des séries Androyennes. La cordiérite est formée de cordiérite bleutée, phlogopite, plagioclase, tourmaline verte, chlorite, pyrite, spinelle et sillimanite. Le saphir est disséminé au sein de la cordiérite mais très souvent relié à des microfissures générées par des mouvements en cisaillement. Les bordures de la lentille sont également reprises par les cisaillements et l'interaction fluide roche a provoqué une biotitisation de la roche encaissante.

Les saphirs sont polychromes et ils présentent des bandes de couleurs distinctes (Koivula *et al.*, 1992). Dans un plan parallèle à l'axe c, le cristal est de couleur rosé à mauve, et dans une direction perpendiculaire à l'axe c, le cristal présente une alternance de fines bandes de couleur bleu vert, orange, marron, rose et parfois rouge rubis. La taille des cristaux est comprise entre 1 et 10 mm. La forme cristalline la plus fréquente correspond à l'association du prisme hexagonal aplati ou allongé à la bipyramide.

b2/ Le gisement de rubis d'Ambatomena. Il se situe à 10 km au nord-est de la ville de Isoanala (Fig. 1). Il fut exploité entre 2000 et 2001 par une société minière privée. Les rubis sont de très bonne qualité gemme et les cristaux ont une taille de 3 cm de long et un diamètre qui peut atteindre 2 cm. Le gisement est encaissé dans les séries de l'Androyen composées de paragneiss, d'orthogneiss, de marbre, de granite, de pyroxénite et de quartzite. Le rubis est contenu dans des lentilles de cordiérites intercalées dans une charnockite à biotite-sillimanite et cordiérite, et des pegmatites. La zone minéralisée a subi une importante métasomatose alcaline caractérisée par la transformation de la pegmatite en plagioclase (anorthite) et une biotitisation magnésienne de la charnockite et de la cordiérite. Les phlogopites sont dépourvues de rubis. Dans les zones de contact entre la cordiérite et la charnockite, la métasomatose alcaline a généré des roches à saphirine, anorthite, phlogopite contenant parfois du rubis. La minéralisation à rubis se trouve dans les cordiérites composées de cordiérite, de rutile, de feldspath potassique, de saphirine, de phlogopite et parfois de pyroxène (Fig. 3F). Les cristaux de rubis présentent une texture coronitique marquée par le développement d'une couronne de spinelle autour du corindon, le spinelle résultant de la rétrogenèse du rubis.

c- Les gisements de rubis dans les roches mafiques et les anorthosites

Les gisements de rubis se trouvent dans l'unité du Vohibory limitée à l'Est par la zone de cisaillement d'Ampanihy (Fig. 1).

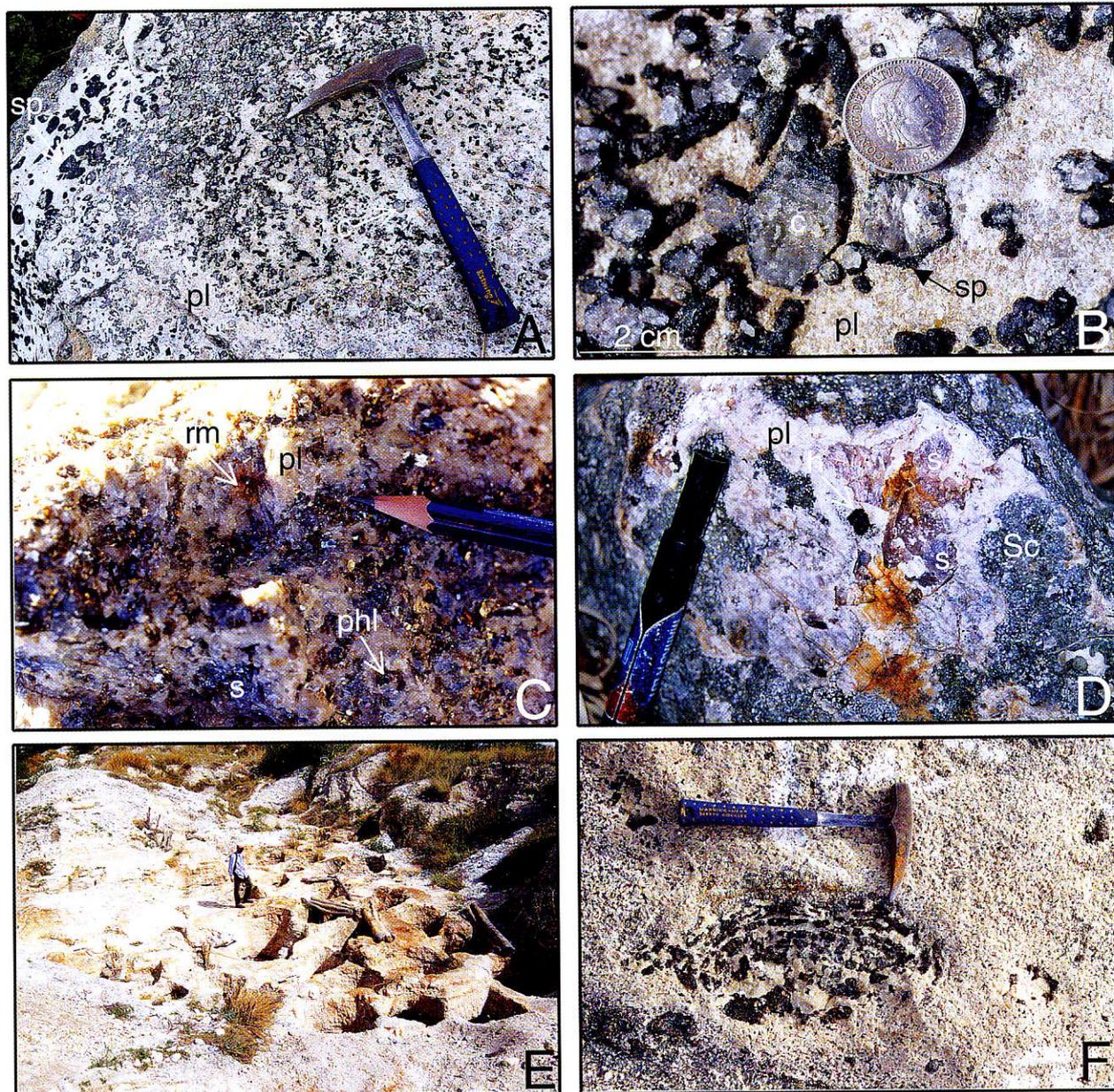


Figure 4 : Les gisements de type skarn et les "sakénites" du sud-est de Madagascar.

Figure 4: Skarn deposits and "sakenite" occurrences of south-east Madagascar.

A - Veine de plagioclase (pl) à corindon (c)-spinelle (sp) ± hibonite formée à la bordure d'une pyroxénite (gisement de Bekinana, région de Tranomaro).

Corundum (c) -spinel (sp) ± hibonite-bearing plagioclase (pl) vein developed at the border of a pyroxenite (Bekinana deposit, Tranomaro area).

B - Détail de la figure 4A. Couronne de spinelle (sp) formée autour du corindon (c) dans la matrice feldspathique (pl).

Detail of figure 4A. Corona of spinel (sp) developed around corundum (c) in the feldspathic matrix (pl).

C - La "sakénite" de Vohidava (région de Ianabinda). Association de saphir (s), phlogopite (phl) et minéraux radioactifs (rm) dans une matrice de plagioclase (pl).

The "sakenite" of Vohidava (Ianabinda area). Association of sapphire (s), phlogopite (phl) and radioactive minerals (rm) in a matrix made of plagioclase (pl).

D - Roche à scapolite (Sc) présentant une ségrégation de plagioclase (pl) à hibonite (h) et saphir bleu à rose (s). Gisement de Analalava (région d'Andranondambo).

Scapolite (Sc) with a plagioclase segregation (pl) made of hibonite (h) and pink to bluish sapphire (s) at Analalava (Andranondambo area).

E - Puits de mine du gisement à saphir bleu d'Andranoboaka (région d'Andranondambo).

Blue sapphire deposit excavations in the Andranoboaka mine (Andranondambo area).

F - Enclave de clinopyroxénite dans un marbre impur de la mine d'Andranoboaka (région d'Andranondambo).

Aspect of a clinopyroxenite enclave in an impure limestone from the Andranoboaka mine (Andranondambo area).

Cette unité est composée de gneiss amphibolitiques qui comprennent des intercalations d'amphibolites, de marbres et d'orthogneiss. Les complexes mafiques et ultramafiques de péridotites, gabbros et troctolites sont transformés en amphibolites et serpentinites lesquelles sont associées à des veines plagioclasiques (Nicollet, 1986). Les gisements de rubis se situent au nord de la ville d'Ampanihy entre les villages d'Ejeda et de Fotadrevo. Il s'agit des gisements de Maniry, Gogogogo, Vohitany, Anavoaha, Vohidava, Marolinta et Ianapera qui sont exploités de façon sporadique par les paysans (Mercier *et al.*, 1999).

Le rubis est associé à différentes roches métamorphiques du faciès granulite à des pressions $P \sim 8$ et 11 kbar et des températures $T \sim 750$ à 800°C (Nicollet, 1986) : (i) dans des amphibolites sous la forme de zones parallèles à la foliation de plusieurs décimètres de long et quelques centimètres de large. Deux associations minérales sont décrites : 1) hornblende, plagioclase, rubis, spinelle et phlogopite ; 2) hornblende, plagioclase, rubis, \pm saphirine, gédrite, grenat et spinelle. Les cristaux de rubis combinent le prisme hexagonal $a \{11.0\}$ au pinacoïde $c \{00.1\}$; les cristaux sont généralement aplatis et ils peuvent atteindre un diamètre de 10 cm avec un prisme toujours très court ; (ii) anorthosite en bandes et/ou veines qui présentent deux types d'associations minérales (Nicollet, 1986) : 1) anorthite, rubis, \pm grenat, \pm hornblende, \pm spinelle ; 2) anorthite, rubis, spinelle, zoïsite, \pm clinopyroxène, \pm hornblende. Par ailleurs dans le gisement de Vohitany, des pegmatites déquartzifiées recoupent les amphibolites (Giuliani *et al.*, 2006). Au contact des deux roches, la circulation de fluides a transformé la pegmatite et l'amphibolite respectivement en plagioclasite et biotite (micas de type phlogopite) à rubis. La formation des roches métasomatiques est accompagnée de cisaillements, et un ensemble de petites veinules à anthophyllite et rubis ("stockwork") recoupe les roches métasomatiques. Lacroix (1922a) a décrit des veines de plagioclasites appelées "sakénites à rubis" à Anavoaha ; elles sont formées d'anorthite et de clinopyroxène (Fig. 2E).

d- Les gisements de saphirs associés aux marbres

En 1952, le géologue français Hibon rapporta la présence de saphir éluvial associée à la hibonite (minéral hexagonal de couleur noire, de formule $\text{CaAl}_{12}\text{O}_{19}$) au sud du village d'Andranondambo (Fig. 1). En 1991, le premier gisement de saphir fut découvert à Esiva. La nouvelle se répandit rapidement et en 1996, 10.000 mineurs exploitaient des puits profonds d'une quinzaine de m et de 50 à 80 cm de large (Fig. 4E) notamment à Andranondambo, Antirimena, Analalava et Andranomitrohy.

Les gisements de saphirs de la région de Tranomaro se localisent

dans les formations granulitiques du groupe Tranomaro (Rakotondrazafy *et al.*, 1996). Ce groupe d'âge Protérozoïque est formé de roches méta-sédimentaires (métapélites, calc-silicates et marbres) intercalées dans des gneiss leucocrates. Au cours du métamorphisme, les marbres et les gneiss à minéraux calciques ont été transformés en skarns. Ils sont formés de marbres calcitiques impurs (Fig. 4F), de diopsidites (mélanges variables de diopside, scapolite, spinelle, thorianite et pargasite), et de roches peralumineuses formées de plagioclase et/ou scapolite avec spinelle, thorianite, hibonite et/ou du saphir bleu à rose (Fig. 4A, B et D). La clinopyroxénite se forme très souvent au contact entre le marbre et des intrusions de granites ou de charnockites. Une origine métasomatique est proposée par Rakotondrazafy *et al.* (1996) et trois stades de cristallisation sont définis pour les skarns :

- Métasomatose (stade 1) à $T \sim 850^\circ\text{C}$ et $P \sim 5$ kbar. Des ségrégations à méionite, spinelle, thorianite et corindon se forment dans une matrice à titanite, scapolite et diopside alumineux ;

- Métasomatose (stade 2) à $T \sim 800^\circ\text{C}$ et $P \sim 3-3,5$ kbar. Le diopside est partiellement transformé en pargasite riche en fluor, et la scapolite en anorthite + calcite. La thorianite se forme avec une phlogopite riche en fluor, et la hibonite cristallise aux dépens du saphir et du spinelle (Fig. 4D) ;

- Métamorphisme rétrograde (stade 3) à plus basse température et pression. Des lentilles à phlogopite associée à la calcite, le diopside et l'anhydrite, et des veines tardives à calcite riche en terres rares, zircon, titanite, urano-thorianite recoupent le "complexe calco-magnésien". Au cours du stade 3, des veines à feldspath potassique et saphir bleu gemme recoupent les marbres. Les veines sont verticales et elles possèdent une épaisseur variant du centimètre au décimètre. Le saphir gemme est associé au feldspath potassique, à l'apatite fluorée, la calcite et la phlogopite. Aux bordures des veines, les marbres sont feldspathisés. Les conditions de formation sont estimées à $T \sim 500^\circ\text{C}$ et $P \sim 2$ kbar. Les formes cristallines courantes des saphirs sont les dipyramides $n \{22.3\}$ et $z \{22.1\}$ et le pinacoïde $c \{00.1\}$, le prisme de second ordre $a \{11.0\}$ et le rhomboèdre $r \{10.1\}$ (Schwarz *et al.*, 1996). Les cristaux sont bleus clairs à transparents avec des variations de couleur dans les cristaux très prononcées (bleu foncé à bleu-brun foncé).

Les saphirs gemmes sont à relier à ce stade 3 d'évolution du skarn et non à la phase de cristallisation de la hibonite (Gübelin et Peretti, 1997). Les marbres ont été infiltrés par un fluide syn-métamorphe responsable de la formation des pyroxénites et des minéralisations à thorium et uranium

ainsi que des saphirs (Rakotondrazafy *et al.*, 1996). Les études isotopiques du carbone et de l'oxygène des marbres de Tranomaro montrent que les fluides métasomatiques résultent du mélange de fluides provenant de la dévolatilisation métamorphique des marbres et de fluides contemporains de la formation des granites et des charnockites (Boulvais *et al.*, 1998).

e- Les indices à corindon dans les "sakénites" et les "corindonites"
Le terme "sakénite" a été défini par Lacroix (1941), après la découverte de cette roche à Sakeny, au nord de Ihosy (Fig. 1). D'autres indices sont connus dans le Sud de Madagascar notamment à Vohidava, Anavoha (Fig. 2E), et dans les skarns à thorianite-hibonite de Tranomaro (indice de Bekinana, Fig. 4A).

Il s'agit d'une plagioclasite composée d'anorthite et qui présente parfois une texture coronitique due à un remplacement partiel ou complet des porphyroblastes de corindon par du spinelle (Fig. 2G, 4B) ou par l'association anorthite + spinelle \pm hibonite, ou anorthite + spinelle + saphirine (Fig. 4F), ou anorthite + saphirine.

A Sakeny, les "sakénites" sont des niveaux intercalés au sein de paragneiss alumineux, d'amphibolites et de pyroxénites (Lacroix, 1941). Le niveau principal a une épaisseur de 10 m et une extension proche de 5 km. A Vohidava aux environs de Ianabinda, le niveau à "sakénite" (Fig. 4C), de un mètre de largeur et de plusieurs mètres d'extension, est contenu dans une série de marbres impurs, de pyroxénites et de paragneiss ; le contact avec les roches encaissantes est diffus. A Bekinana, dans la région de Tranomaro, la plagioclasite à saphir, spinelle et hibonite est injectée dans une pyroxénite ; le contact est diffus et il recoupe la foliation métamorphique.

A Sakeny, la "sakénite" présente des variations pétrographiques au sein d'un même niveau, avec localement prédominance d'une espèce minérale. Lacroix (1941) distingue les associations suivantes : anorthite + spinelle + saphirine (Fig. 2I), anorthite + saphir, soit anorthite + (amphibole ou saphirine ou spinelle ou pyroxène), soit des "corindonites" (Fig. 2H). Les "sakénites" sont des roches métamorphiques qui résultent de la métasomatose de roches préexistantes. La nature de la roche initiale est supposée être une marne ou un calcaire argileux (Lacroix ; 1941). Cependant, les compositions isotopiques de l'oxygène des saphirs correspondent à l'intervalle isotopique des corindons associés aux roches mafiques et ultramafiques (Giuliani *et al.*, 2006). Ce résultat corrobore les observations de terrain réalisées à Bekinana et à Vohidava où des pyroxénites sont en contact avec les "sakénites".

D'une manière générale, les saphirs associés aux "sakénites" ne sont pas de qualité gemme. Les rubis associés à la sakénite de Anvoha (collection Lacroix du MNHN) sont remarquables (Fig. 2E).

Les "corindonites" (roches à corindon) s'observent sous la forme de galets dans les rivières. Elles ont été décrites dans la région de Beforona, Saka et de Vatmandry (Lacroix, 1922a, b ; Fig. 1). Elles sont soit de couleur grisâtre soit rosâtre ou rouge avec parfois du spinelle (Fig. 2H), muscovite, tourmaline et sillimanite. A Sakeny, les cristaux de corindon sont blanchâtres à jaunâtres (Fig. 2F).

Les gisements secondaires de corindons à Madagascar

Les placers sont localisés dans des environnements soit volcaniques soit sédimentaires.

Dans les provinces basaltiques

a- Les gisements de saphir de la province d'Antsiranana se situent à 70 km au sud de la ville d'Antsiranana, dans les régions d'Anivorano et d'Ambondromifehy, ainsi que sur l'île de Nosy-Be (Fig. 1).

La région de la Montagne d'Ambre est recouverte par des roches volcaniques sur environ 3500 km². Les coulées volcaniques sont formées par des éruptions successives de basaltes alcalins, tufs, pouzzolanes et de pyroclastites qui contiennent des enclaves de péridotites. Les cratères, les coulées et les maars sont remarquablement conservés. Il s'agit d'un volcanisme cénozoïque. Lacroix (1922a) a noté la présence d'un cristal de saphir, du zircon, du spinelle et de la hornblende dans des enclaves syénitiques incluses dans les scories du Lac Mahery ainsi qu'un cristal de saphir provenant d'un basalte de l'île de Nosy Mitsio.

Les dépôts de saphirs sont contenus dans des paléoplacers formés dans des fractures et des cavités karstiques associées aux calcaires et arénites Jurassiques de l'Ankaratra (Fig. 5A). Ces karsts à saphirs uniquement se situent au sud du massif volcanique de la Montagne d'Ambre. Les éléments du paléoplacer sont des cristaux transportés et cassés de saphirs de couleur bleu, vert et jaune (Fig. 5C), de spinelle noir, de zircons de couleur orange à rouge ("hyacinthe" des anciens auteurs), et d'oxydes de fer arrondis, des pisolithes ferrugineux, et des fragments anguleux de calcaires et des produits ferrugineux provenant de l'érosion de cuirasses latéritiques (Fig. 5B). Le ciment des éléments est soit carbonaté (gisement de Ambohangimamy, Maromikotra, Sanaderikely) soit siliceux (gisement de Maventibao).

Les saphirs ont un habitus en barillet. La dipyramide hexagonale *w* ou *z* est la forme dominante et elle se combine au

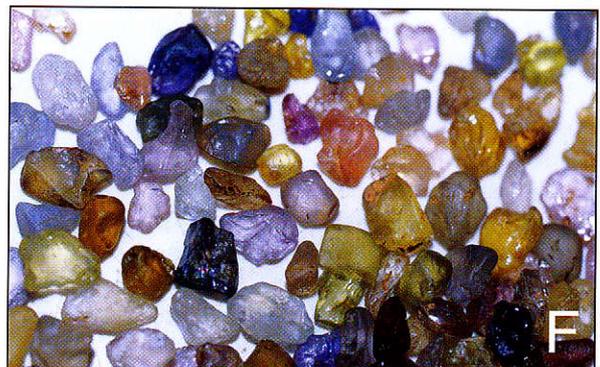
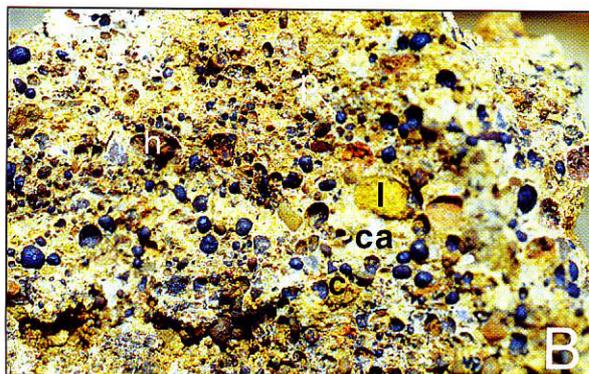
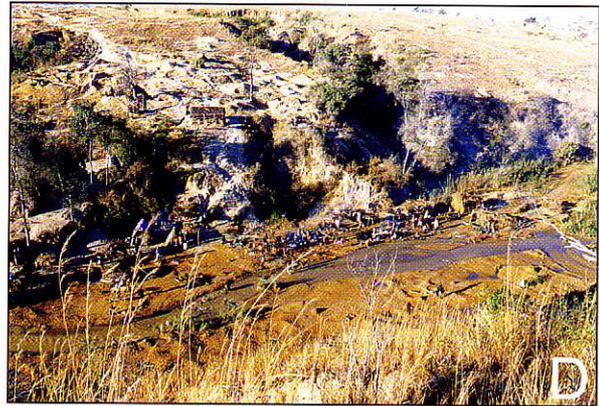
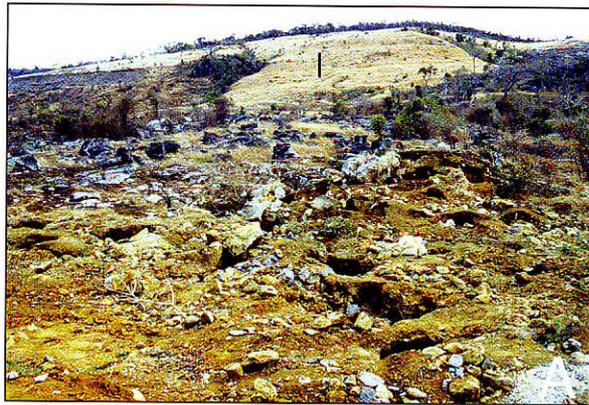


Figure 5 : Les placiers à corindon de Madagascar.

Figure 5: The corundum-bearing placiers of Madagascar.

A - Vue panoramique des puits du gisement de saphirs de Maramikatra creusés dans les calcaires du Jurassique (l). (région d'Ambondromifehy, Montagne d'Ambre).

General view of the Maramikatra prospecting pits dug in the Jurassic limestones (l). (Ambondromifehy area, Montagne d'Ambre).

B - Aspect du paléoplacier à saphir de Maramikatra. Pisolithes ferrugineux (p), nodules de limonite (l), hématite (h), fragments de calcaires (c) cimentés par une matrice carbonatée (ca). La taille du nodule de limonite ~ 2 cm.

Aspect of the sapphire-bearing paleoplacer of Maramikatra. Ferruginous pisoliths (p), limonite nodules (l), hematite (h), calcareous fragments (c) cemented by carbonates (ca). Size of the limonitic nodule ~ 2 cm.

C - Les saphirs de couleur "Bleu-Vert-Jaune" du gisement de Maventibao (région d'Ambondromifehy). Les cristaux ont une taille comprise entre 5 et 10 mm.

The "Blue-Green-Yellow" sapphires from the Maventibao prospecting pits (Ambondromifehy area). The crystals have an average size of 5 to 10 mm.

D - Le placier à corindons gemmes de Manumbo Vaovao en Août 2003 (30 km au Sud d'Ilakaka).

The gem corundum placer deposit of Manumbo Vaovao in August 2003 (30 km South of Ilakaka).

E - Vue du placier à corindons gemmes d'Ilakaka, dénommé "La Banque Suisse". La position du niveau de galets gemmifères qui se trouve au dessous du déblai est indiqué par la flèche.

View of the Ilakaka placer at the site called "La Banque Suisse". The gravel levels are reached by a succession of banks which keep the mining site in good condition. The position of the gem-bearing pebble level is indicated by the arrow.

F - Les saphirs colorés du placier d'Ilakaka. La taille des cristaux est comprise entre 6 et 10 mm.

The fancy sapphires from the Ilakaka placer. The size of the crystals is between 6 to 10 mm.

pinacoïde *c*. Les petites faces du rhomboèdre *r* et de la dipyramide hexagonale *n* sont présentes. Les saphirs sont parfois polychromes et un grand nombre d'échantillons présentent des surfaces blanc laiteux ou bleu et parfois translucides. Les saphirs ne sont pas tous gemmes et l'exploitation mécanisée de la mine ABFG située à Anivorano nord, entre 1998 et mi-2000, a permis d'estimer que seulement 17% du brut pouvait être traité par chauffage et taillé (Schwarz *et al.*, 2000). La mine extrayait 3 à 5 kg de saphirs en 10 heures d'exploitation et 5kg de brut produisait 180 g de pierres potentiellement taillable (soit 3,6%). Les saphirs de couleur bleu à bleu vert représentaient 88% du brut, et la gamme de poids 0,1 - 0,5 gramme environ 70% de la production totale.

En 2001, deux gisements de saphirs en environnement basalitique ont été découverts sur l'île de Nosy-Be et sur la péninsule d'Ambato (Ramdhor et Milisenda, 2004). A Nosy-Be, les saphirs bleus, verts ou jaunes du gisement de Betofaka sont associés à des zircons rouges à orangés, et des galets de basaltes au sein d'une couche limoneuse, située à un mètre au dessus d'un socle granitique. A Andovokonko sur la péninsule d'Ambato, les saphirs se localisent en bordure de mer sur la surface du basalte. Ils se concentrent dans l'estran c'est-à-dire la portion du littoral comprise entre les plus hautes et les plus basses mers. Ils sont très souvent recouverts par une croûte de calcaire.

b- Les gisements de rubis et de saphirs alluviaux se situent dans la partie sud-est du massif volcanique de l'Ankaratra (Fig. 1). Ces dépôts signalés par Lacroix (1922a) étaient extraits de différentes localités, rubis et saphir à Andriankely, saphirs bleu-vert-jaune à Ampitatafika, Vohimena, Ambatotsipihana, Maroparasy, Sambaina, Ambohimandroso, Iankiana, Vontovorona, Mahanoro, Faratsiho, Vakinakaratra and Belambo. Aujourd'hui, les exploitations perdurent et d'autres gisements sont découverts comme les saphirs de Kianjanakanga-Mandrosohasina et les rubis de Antsabostraka. Dans ces deux derniers gisements, les corindons sont associés à des zircons et des galets de basaltes et de phonolites cimentés par des sols latéritiques.

c- En 2000, deux nouveaux gisements de corindons gemmes ont été découverts dans la région de Vatomaniry et d'Andilamena (Fig. 1).

Les gisements de la région de Vatomaniry (Amfao, Ambodilalona) sont des placers alluvionnaires qui contiennent des rubis, et des saphirs verts, transparents à jaunes, et parfois bleus. Ces dépôts se situent dans les parties basses des bassins fluviaux et ils sont extraits à la batée. L'origine de ces corindons sont des paléoplacers situés dans les par-

ties hautes des bassins. Les éléments de la roche consolidée, des galets de granite, pegmatite et basalte, et des cristaux arrondis et cassés de magnétite, zircons orangés à rouges, rubis et saphirs, et des minéraux lourds noirâtres sont cimentés par une matrice siliceuse.

Le gisement d'Andilamena est un placer géant à rubis et saphirs. Les descriptions du placer et de son environnement géologique ne sont pas encore détaillées. Les compositions isotopiques de l'oxygène des rubis d'Andilamena indiquent une roche hôte de type mafique-ultramafique ou une pegmatite déquartzifiée dans une roche mafique-ultramafique (Giuliani *et al.*, 2006).

Dans les provinces sédimentaires

Il s'agit des placers de la région d'Ialakaka-Sakaraha dans l'Isalo (Fig. 1). Le placer géant d'Ialakaka a été découvert en 1998 sur le bord de la route nationale 7 et la ruée des paysans locaux et des émigrants a permis de découvrir depuis d'autres gisements dans la région (Sakalama, Ampasimami-Taka, Vohimena, Bekily et Manombo Vaovao ; Fig. 5D).

Le gisement d'Ialakaka (Fig. 5E) fournit des saphirs de toutes les couleurs allant du bleu, au rose, jaune, mauve et vert, très souvent plats et de poids moyen inférieur à 5 carats (Fig. 5F). Des saphirs bleus de plus de 9 carats ont été découverts ainsi que du rubis. Les saphirs sont associés à du chrysobéryl, de la topaze, du grenat, du spinelle, du zircon, de la tourmaline, de l'andalousite et des verres volcaniques. En 2002, la compagnie Gem Mining Resources présenta les résultats de 38 jours de production mécanisée soit 43 kilos de gemmes dont 4% de pierres de couleur et de rubis, et 96% de saphirs (58% de saphir rose, 30% de bleu et 8% de saphirs colorés).

Les mineurs indépendants descendent dans des puits de profondeur supérieure à 20 mètres et de 80 cm à 1 m de diamètre, sans sécurité et assistance. Les graviers gemmifères sont remontés dans des seaux par un système de corde et poulie, puis le gravier est lavé à la batée. Les mineurs exploitent les terrasses alluviales anciennes des rivières Ialakaka et Benahy qui reposent sur les grès de l'Isalo. Il s'agit de paléo-placers : des sables qui renferment des blocs de grès de l'Isalo et des galets de quartz, quartzites et schistes. Ces terrasses sont peu consolidées. Sur la rivière Benahy, trois niveaux gemmifères sont exploités. Les concentrations à saphirs de ces terrasses peuvent varier de 0,4 à plus de 5 g/m³ (Garnier *et al.*, 2004). Par ailleurs, les sables de rivières actuelles ont des teneurs en saphir comprises entre 0,2 et 2,1 g/m³. La source primaire des saphirs n'est pas encore connue mais, pour les rubis, la source primaire serait les amphibolites à rubis du domaine granulitique du Vohibory (Giuliani *et al.*, 2006).

Références

- 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, p. 103.
- Besairie H., 1966. Gîtes minéraux de Madagascar. *Annales Géologiques de Madagascar, Fascicule XXXIV*, Tananarive, p. 437.
- Boulvais P., Fourcade S., Gruau G., Moine B., Cuney M., 1998. Persistence of pre-metamorphic C and O isotopic signatures in marbles subject to Pan-African granulite-facies metamorphism and U-Th mineralization (Tranomaro, Southeast Madagascar). *Chemical Geology* 150, pp. 247-262.
- De Wit M.J., 2003. Madagascar : Heads it's a continent tails it's an island. *Annual Review of Earth and Planetary Science* 31, pp. 213-248.
- Duclos J., 1927. Corindon Fanovana. *Archives du Service Géologique de Madagascar, B*, p. 115.
- ExtraLapis, 1999. Madagascar. A mineral and gemstone paradise. extraLapis English N°1. Jarnot M.D., Neumeier G.A., Simmons W.B., Staebler G.A. (Eds.), *Lapis International LLC*, East Hampton, p. 97.
- Garnier V., Giuliani G., Ohnenstetter D., Schwarz D., 2004. Saphirs et rubis. Classification des gisements de corindon. *Le Règne Minéral* 55, pp. 4-47.
- Gem Mining Resources, 2002. Ilakaka Test mine. www.gmrcorp.com/page/ilakaka.html.
- Giuliani G., Fallick A.E., Rakotondrazafy M., Ohnenstetter D., Andriamamonjy A., Ralantoarison Th., Rakotosamizany S., Razanatsheho M., Offant Y., Garnier V., Dunaigre Ch., Schwarz D., Mercier A., Ratrimo V., Ralison B., 2006. Oxygen isotope systematic of gem corundum deposits in Madagascar : relevance for their geological origin. *Mineralium Deposita*. on line December, DOI 10.1007.
- Gübelin E.J., Peretti A., 1997. Sapphires from the Andanondambo mine in SE Madagascar : evidence for metasomatic skarn formation. *The Journal of Gemmology* 25, 3, pp. 453-516.
- Koivula J.I., Kammerling R.C., Fritsch E., 1992. Sapphires from Madagascar. *Gems & Gemology* 38, pp. 203-204.
- Lacroix A., 1922a. Minéralogie de Madagascar. Tomes 1, 2, 3. Challamel, A. (Ed.), Paris.
- Lacroix A. 1922b. Sur une syénite à corindon et sillimanite formée par endomorphisme de granite. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 174, pp. 899-904.
- Lacroix A., 1941. Les gisements de phlogopites de Madagascar et les pyroxénites qui les renferment. *Annales Géologiques du Service des Mines*, Imprimerie officielle, Tananarive, p. 115.
- Martelat J.E., Lardeaux J.M., Nicollet C., Rakotondrazafy R., 2000. Strain pattern and late Precambrian deformation history in southern Madagascar. *Precambrian Research* 102, pp. 1-20.
- Mercier A., Rakotondrazafy M., Ravolomiandrinarivo B., 1999. Ruby mineralization in Southwest Madagascar. *Gondwana Research* 23, pp. 433-438.
- Nicollet C., 1986. Saphirine et staurotide riche en magnésium et chrome dans les amphibolites et anorthosites à corindon du Vohibory Sud, Madagascar. *Bulletin de Minéralogie* 109, pp. 599-612.
- 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.
- Offant Y., 2005. Caractérisation pétrographique et minéralogique du gisement à saphir de Sahambano (Madagascar). MSc Thesis University Paul Cézanne, Aix-en Provence, France, p. 33.
- Pezzota F., 2005. Rubini e Zaffiri. Corindoni policromi di Amboarohy, Ihosy, Madagascar. *Rivista Mineralogica Italiana* 2, pp. 116-124.
- Rakotondrazafy A.F.M., 1995. La hibonite (CaAl₁₂O₁₉) du sud-est de Madagascar. Caractères et modalités de formation dans les skarns à thorianite du faciès granulite. Unpublished PhD Thesis, University Toulouse III-Antananarivo, p. 195.
- Rakotondrazafy A.F.M., Moine B., Cuney M., 1996. Mode of formation of hibonite (CaAl₁₂O₁₉) within the U-Th skarns from the granulites of S-E Madagascar. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 123, pp. 190-201.
- Rakotosamizany S., 2003. Les gisements de rubis de Saomiakatra : caractères minéralogiques - gemmologiques - conditions de formation (au Sud d'Antanifotsy). Unpublished MSc. Thesis, University of Antananarivo, Madagascar, p. 74.
- 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, p. 100.
- Ralantoarison Th., Offant Y., Andriamamonjy A., Giuliani G., Rakotondrazafy AFM., Ohnenstetter D., Schwarz D., Fallick A., Razanatsheho M., Rakotosamizany S., Moine B., Baillot P. (2006) : Les saphirs multicolores de Sahambano et Zazafotsy, région granulitique d'Ihosy, Madagascar. *Revue de Gemmologie*, 158, pp. 4-13.
- Ramdhor R., Milisenda C.C., 2004. Neue Vorkommen von saphir-seifenlager stätten auf Nosy-Bé, Madagaskar. *Zeitschrift Der Deutschen Gemmologischen Gesellschaft* 53, 4, pp. 143-158.
- Salerno S., 1992. Minéraux et Pierres de Madagascar. *Revue de Gemmologie* 111, pp. 9-10.
- Schwarz D., Petsch E.J., Kanis J., 1996. Sapphires from the Andranondambo region, Madagascar. *Gems & Gemology* 32, pp. 80-99.
- Schwarz D., Kanis J., Schmetzer K., 2000. Sapphires from Antsiranana Province, Northern Madagascar. *Gems & Gemology* 36, 3, pp. 216-233.
- Schwarz D., Schmetzer K., 2001. Rubies from the Vatomaniry area, eastern Madagascar. *Journal of Gemmology* 27, 7, pp. 409-416.