

UNIVERSITÉ PAUL CEZANNE - UNIVERSITÉ DE PROVENCE

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT d'AIX-MARSEILLE

Master SET

Université Paul Cezanne
Université de Provence



Spécialité : Géosystèmes

Parcours : GÉOSCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

**CARACTERISATION PETROGRAPHIQUE ET
MINERALOGIQUE DU GISEMENT A SAPHIR DE
SAHAMBANO (MADAGASCAR)**

Par

OFFANT Yohann

Responsable de Stage : GIULIANI Gaston (IRD et CRPG/CNRS)
OHNENSTETTER Daniel (CRPG/CNRS)
MARSHALL Dan (Simon Fraser University, Canada)

Année : 2004 – 2005.

Résumé

Le gisement à corindon de Sahambano est unique à Madagascar. Il est situé au sud de l'île, dans la zone de cisaillement de Ranotsara. L'origine des corindons de Sahambano est due à une circulation de fluide métasomatique dans des gneiss d'âge panafricain (550 Ma). Ils sont généralement accompagnés de grenat, spinelle, feldspath potassique et surtout de biotite, qui constitue parfois de véritables roches monominérales appelées biotitites, au sein des gneiss feldspathiques. La présence d'un minéral rare « la musgravite » a été identifiée dans des cipolins. Le géothermomètre grenat-biotite et la stabilité de la sillimanite, définissent un domaine de cristallisation des corindons d'environ 700°C et 4-5 kbar.

Les saphirs de la mine présentent une grande diversité de couleurs. Cette gamme de couleur est due à une variation importante de la concentration en chrome avec fer constant, lors de la circulation des fluides. Ce chrome provient en majeure partie du fluide lui-même, contrairement à d'autres éléments chimiques comme le fer ou l'aluminium qui proviennent vraisemblablement de l'encaissant gneissique. Les saphirs rose-orangés de Sahambano présentent en grande partie, les caractéristiques des padparadschas Sri Lankais. La réglementation au sujet de cette appellation est assez drastique car leur rareté et donc leur prix, dépassent largement ceux des saphirs du Cachemire ou des rubis de Mogok. Notre étude propose un nouveau critère chimique pour la classification de ces saphirs rose-orangés.

Mots-clés : Madagascar, saphir coloré, gneiss, biotitite, métasomatose-K, padparadscha

Abstract

The Sahambano corundum mine is unique to Madagascar. It is located at the south end of the island, in the shear zone of Ranotsara. The origin of the corundum is related to metasomatic fluids circulating within the Proterozoic Panafrican gneiss. The composition of the gneiss varies locally but in general is comprised of garnet, spinel, potassic feldspar and biotite. It also contains monomineralic layers such as biotitites and calcitic marbles where the musgravite, a rare Be-Al-Mg oxide, has been identified. Garnet-biotite geothermometry and the stability of sillimanite are consistent with corundum precipitation at approximately 700°C and 4 to 5 kbars.

The sapphires at Sahambano display a large variation in colour. The colour is due mostly to variations in Chromium with constant Iron, during the metasomatic fluids circulating. The chromium is interpreted to be sourced from the metasomatic fluid while the Aluminium and Iron appear to be sourced from the gneissic host rocks. The pinkish-orange sapphires from Sahambano display characteristics similar to the "padparadschas" of Sri Lanka. The rarity of the pinkish-orange sapphire makes them prized throughout the world and hence they are relatively highly priced, with their values sometimes surpassing that of the Kashmiri sapphires and the Mogok rubies. Our study proposes new chemical criteria for this pink-oranges sapphire.

Keys words: Madagascar, colored sapphire, gneiss, biotitite, K-metasomatism, padparadscha

I- INTRODUCTION

Le corindon est un oxyde d'alumine de formule chimique Al_2O_3 (Annexe A). A Madagascar, les gisements de corindon ont été découverts et décrits par Lacroix au début du XXème (Annexe A). Depuis quelques années, de nouveaux gisements sont exploités comme ceux d'Ilakaka ou d'Andranondambo dans le sud de l'Ile (Annexe A). Le gisement de Sahambano compte aussi parmi les gisements récemment découverts. Il est situé dans la province de Fianarantsoa (Sud de Madagascar), à environ 20 km au Sud Est de la ville d'Ihoso (figure 1). Les premiers indices à corindon ont été découverts en 1988 et le gisement est aujourd'hui exploité par la société « Mines Tany Hafa ». L'exploitation principale (numéroté 1 sur la figure 1), se trouve à environ 5 km au Nord-Est du petit village de Sahambano, mais d'autres zones minéralisées sont répertoriées notamment dans les secteurs 2 et 3 de la figure 1. Le relief est marqué par de grandes structures tectoniques orientées NNW/SSE (figure 1). Ces structures témoignent d'une forte activité tectonique en relation avec l'orogénèse Panafricaine et son métamorphisme régional associé (Pili, 1997). La petite chaîne du Manivala fait partie de la bordure Est de la grande faille de Ranotsara qui traverse tout le Sud Est de Madagascar (figure 1). Cette faille est en fait une grande zone de cisaillement de 25 km de large sur plus de 300 km de long. Le gisement à corindon de Sahambano est situé à l'intérieur de cette zone de cisaillement.

Ce gisement possède un intérêt géologique particulier. En effet, les corindons se situent dans des gneiss feldspathiques biotitisés, en définissant des zones lenticulaires orientées suivant la foliation régionale, parallèle à la direction de cisaillement NNW/SSE. Ce type de lithologie à corindon est déjà connu en Inde (Santosh et Collins, 2003), mais il n'a encore jamais été décrit à Madagascar. Afin de comprendre les mécanismes responsables de la genèse de ces corindons, nous avons réalisé une étude pétrographique et géochimique sur les paragenèses minéralisées, et sur celles stériles. Pour cela des observations sous le microscope optique puis au microscope électronique à balayage (MEB) ont été réalisées sur les différents faciès du gisement. Les secteurs échantillonnés sont reportés sur la figure 1. L'étude des paragenèses et des textures réactionnelles nous a permis dans un deuxième temps, d'établir un diagramme pression température et d'aborder ainsi, les conditions de formation de ces corindons.

La grande diversité de couleur des corindons est une autre caractéristique du gisement de Sahambano. Toutes les couleurs y sont représentées sur une zone de minéralisation restreinte et de faible épaisseur (quelques décimètres au maximum) ; alors que la plupart des gisements malgaches ne présentent qu'un seul type de couleur, même sur de grandes surfaces d'exploitation (Annexe A). Parmi les couleurs trouvées à Sahambano (comme le bleu, le violet, le rose, le rouge ou le vert), se trouve le rose-orangé. Les saphirs de cette couleur présentent un intérêt économique surpassant ceux du saphir et du rubis. Elle caractérise les padparadschas décrit pour la première fois au Sri Lanka (Notari, 1997), saphirs très rares et donc précieux. Afin de comprendre le mécanisme responsable des différentes colorations des corindons sur le gisement, mais aussi de savoir si ces saphirs rose-orangés peuvent porter le nom de padparadscha, des études minéralogiques et géochimiques des différents corindons colorés ont été réalisées au MEB et à la microsonde électronique.

Ce travail de caractérisation minéralogique et pétrographique, s'ajoute aux autres études réalisées sur les différents types de gisement à corindon existant à Madagascar (Annexe A). Leurs principales caractéristiques sont présentées sous la forme d'une synthèse bibliographique. Cet important travail bibliographique est joint en annexe A. L'annexe B comporte la majeure partie des résultats rassemblés sous la forme de tableaux et de figures illustrant le texte, mais qui ne sont pas essentiels à sa compréhension.

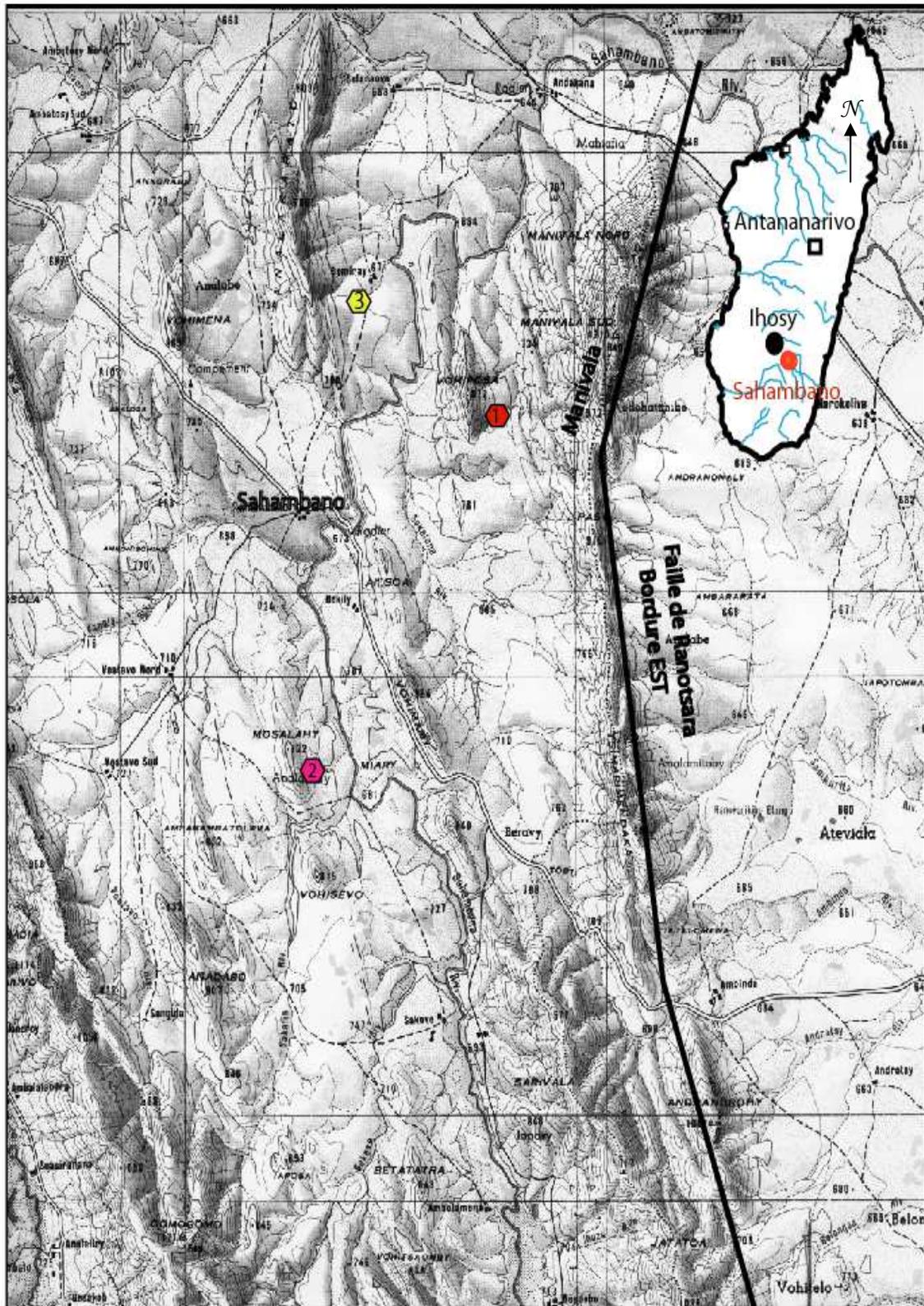


Figure 1 : Carte topographique de Sahambano (1/200.000^{ème}). Les numéros sont les secteurs de prélèvement d'échantillons. On peut observer la chaîne du Manivala qui constitue la bordure Est de la faille de Ranotsara et les grandes structures de déformation associées, orientées NNW/SSE.

II- MATERIEL ET METHODES

II-1 Le microscope optique

Les lames minces polies des différents types de roches ont été observées sous un microscope Olympus BH2-HLSH. Les photos numériques des minéraux et textures ont été réalisées avec un appareil photographique Olympus Camedia C3030-ADL. Les minéraux des différentes lames minces ont été observés aux grossissements x5, x10, x25 et x50.

II-2 Le Microscope Electronique à Balayage (MEB)

Les observations ont été effectuées sur un MEB Hitachi S2500 de l'Université d'Henri Poincaré de Nancy I, sur une distance de travail comprise entre 10 et 20 mm et sous une tension de 15 à 20 Kv. Les détecteurs de photons X et d'électrons rétrodiffusés sont de type EDS (Energy Dispersive Spectrometer). Le détecteur d'électrons secondaires est un détecteur d'Everhart-Thornley. Les échantillons étudiés sont des lames minces polies déjà observées sous le microscope optique (identification des minéraux et textures), et des sections polies de corindons (étude des inclusions minérales solides, état de fracturation, homogénéité...). Avant chaque analyse, les échantillons sont métallisés au carbone en surface afin d'obtenir une bonne conduction et avoir un bon écoulement des charges. L'échantillon est ensuite balayé par la sonde électronique et plusieurs phénomènes vont se produire : diffraction d'électrons, émission d'électrons secondaires et d'électrons Augier, émission de photons X ... Chacun de ces effets peut donner lieu à la formation d'une image. Le microscope peut également travailler en sonde fixe permettant une microanalyse semi-quantitative. Ce type d'appareil est donc utilisé pour identifier visuellement ou chimiquement des minéraux de très petite taille comme des inclusions ou en réactions texturales.

II-3 La microsonde électronique

Les analyses ont été effectuées sur une microsonde électronique CAMECA camebax SX 50 et SX100 à l'université Henri Poincaré de Nancy I. Les échantillons analysés sont des lames minces de roches de différentes natures et des sections polies de corindons de différentes couleurs. Avant chaque analyse, les échantillons sont métallisés au carbone. Ensuite un faisceau incident très fin d'électrons entre en contact avec l'échantillon. Les électrons de la matière sont alors excités et émettent un rayonnement X primaire. Ce rayonnement est ensuite analysé par des spectromètres qui explorent chacun, une gamme de longueurs d'ondes précises. Il est possible de faire une analyse quantitative d'un élément donné si le spectromètre est fixé sur la longueur d'onde caractéristique correspondante. Il compte le nombre d'impulsion du détecteur pendant un temps donné. Après corrections, la fraction de masse de l'élément est connue. Enfin, l'intensité du rayonnement mesurée au détecteur donnée par l'échantillon, est comparée à celle produite dans les mêmes conditions par des standards contenant les éléments désirés à une concentration connue. La quantification finale des éléments (atomes, % poids) est réalisée par le programme PAP de Pouchou et Pichoir (1991) qui permet la correction des analyses. Le seuil de sensibilité dépend du numéro atomique des éléments mesurés, du temps de comptage (s), de la tension (Kv) et du courant (nA) utilisés. Le tableau 1 résume les seuils de détection obtenus pour chaque élément analysé concernant la composition chimique des corindons.

Elément chimique	Al	Ga	V	Ti	Cr	Mg	Fe
Seuil de détection (ppm)	390	54	45	20	24	40	35
Tension (Kv)	15	25	25	25	25	25	25
Courant (nA)	10	150	150	150	150	150	150
Temps de comptage (s)	20	120	120	120	120	120	120

Tableau 1 : Seuil de détection des éléments pour les corindons à la microsonde électronique.

Les analyses chimiques vont nous permettre de savoir avec précision, la composition chimique des différents minéraux de la paragenèse accompagnant les corindons. Dans le cas des corindons, elle nous permettra de voir s'il existe une relation entre la couleur des cristaux et les éléments chimiques en substitution de l'aluminium.

II-4 La spectroscopie Raman

L'appareillage est constitué d'un laser Argon ionisé de type Labram Jobin-Yvon équipé d'un spectromètre de type XY confocal associé à un microscope par transmission, de plusieurs systèmes dispersifs commutables et d'un détecteur multicanal de type CCD (Charge Coupled Device). La longueur d'onde du laser utilisée est de 514,5 nm et il délivre un courant de 10 à 20 mw sur la surface de l'échantillon. Le laser traverse l'échantillon et une partie de la lumière est diffusée par les cristaux avec un changement de longueur d'onde. Les différentes composantes de cette lumière diffusée sont ensuite analysées par des détecteurs mono ou multicanal. Les raies obtenues sont caractéristiques des modes de vibration des liaisons (intra et intermoléculaires) existant entre les atomes constituant le minéral ou le fluide analysé. Le spectre obtenu, composé d'un ensemble de raies appelées raies Raman (cm^{-1}), est donc caractéristique d'une espèce minérale (ou d'un composé moléculaire), ce qui permet de l'identifier.

II-5 La spectroscopie infrarouge

Cette technique de caractérisation a été effectuée sur un spectromètre Leitz-Unicam SP800 UV-VIS et un spectrophotomètre Perkin-Elmer lambda 19. A l'intérieur d'une structure cristalline, chaque liaison peut être assimilée à un oscillateur harmonique qui vibre à une fréquence définie. Si une radiation infrarouge de nombre d'onde donnée rencontre un échantillon contenant une liaison de fréquence de vibration correspondante, l'énergie est absorbée : cela donne une raie d'absorption dans le spectre des infrarouges. Ainsi, la spectroscopie infrarouge va nous renseigner sur les divers cations contenus dans la structure cristalline de l'échantillon analysé. Cette technique a été appliquée sur les corindons colorés.

II-6 Les analyses géochimiques de roches

Les analyses sur roches totales ont été réalisées au service (SARM) du CRPG/CNRS. Les éléments majeurs sont analysés par spectrométrie d'émission à plasma et à couplage inductif avec une ICP-AES Jobin-Yvon JY70 type II. Les éléments en traces sont analysés par spectrométrie de masse à plasma et à couplage inductif avec une ICP-MS Perkin Elmer ELAN 5000.

III – RESULTATS

III-1 : Etude pétrographique

III-1-1 : Etude macroscopique

Le gisement de Sahambano est situé dans des roches métamorphiques formées de gneiss feldspathique et de leptynite. Les corindons se rencontrent dans des zones lenticulaires au sein des gneiss feldspathiques. Ils sont généralement concentrés dans des lits centimétriques à décimétriques de biotitites (roche dont la matrice est uniquement composée de biotite). Ces biotitites, parallèles à la foliation des gneiss, se développent suivant des plans de fractures. Par ailleurs, des veines à biotite et grenat recoupant la foliation des gneiss, se rencontrent aussi sur le gisement et contiennent parfois de rares corindons. L'étude pétrographique des roches de Sahambano a été réalisée sur 9 échantillons du secteur minier (tableau 2). Ces échantillons ne contiennent pas tous du corindon. Le tableau 2 résume les principales caractéristiques macroscopiques (visible à l'œil nu) des échantillons.

Numéro des échantillons	Numéro du secteur prélevé	Caractéristiques macroscopiques
MOII	1	Gneiss feldspathique à grenat et corindon : roche présentant une alternance de lits clairs constitués de feldspath et de lits foncés riche en spinelle, grenat et corindon.
S1 + 125-17	3	Veine à biotite, grenat recoupant les gneiss feldspathiques : roche de couleur sombre constituée d'une matrice très riche en biotite et de phénocristaux de grenat (annexe B-1).
S2 + 127-4	1	Gneiss feldspathique à biotite, grenat et corindon : roche présentant une alternance de lits clairs constitués de feldspath et de lits foncés riche en biotite, grenat et corindon (annexe B-2).
S3	1	Gneiss feldspathique biotitisé: roche de couleur sombre constituée d'une matrice très riche en biotite et grenat. On peut malgré tout encore distinguer des lits plus clairs de feldspath.
SA2 + S15	1	Biotitite à corindon, grenat et feldspath potassique (annexe B-3).
125-9	2	Cipolin : roche carbonatée de couleur blanche pouvant contenir des passées minéralisées à phlogopite, spinelle et feldspath (annexe B-4).

Tableau 2 : Présentation macroscopique des échantillons étudiés.

A la suite de la présentation macroscopique des échantillons, quatre faciès principaux se distinguent et se retrouvent sur l'ensemble du gisement :

- Les gneiss feldspathiques, qui peuvent être plus ou moins riche en biotite. Dans ce faciès on distingue les gneiss feldspathiques, les gneiss feldspathiques à biotite et les gneiss feldspathiques biotitisés (très riche en biotite).
- Les biotitites à grenat et corindon.
- Les veines à grenat-biotite recoupant les gneiss feldspathiques.
- Les marbres à minéraux (cipolins).

III-1-2 Etude microscopique

L'étude des lames minces polies a été réalisée sous le microscope optique et le microscope électronique à balayage (MEB).

III-1-2-1: Gneiss feldspathique à corindon (MOII-9)

Description minéralogique de la lame:

- Feldspath potassique (orthose = FK) : petits cristaux xénomorphes imbriqués en mosaïque et constituant en grande partie la matrice de la lame.
- Grenat : gros monocristaux fracturés automorphes.
- Corindon : un seul monocristal automorphe.
- Spinelle : cristaux xénomorphes en voie de déstabilisation (golfe de corrosion, fracturation, texture coronitique).
- Sillimanite : cristaux en baguettes automorphes issue de la déstabilisation d'autres minéraux. En effet, on les retrouve systématiquement en inclusion dans le spinelle, le grenat, et le feldspath potassique.
- Silicate d'aluminium et de fer : auréole de déstabilisation brunâtre à orangée autour des spinelles et des saphirines. Les analyses chimiques révèle la présence de silice, d'aluminium et de fer (Annexe B-5). Le spectre ressemble à celui d'une kaolinite.
- Saphirine : cristaux xénomorphes en auréole coronitique autour du spinelle. Les formules structurales sont jointes en Annexe B-6.

Description texturale :

L'annexe B-7 résume les différentes inclusions minéralogiques dans les phases majeures présentes dans les différentes lames. Les inclusions de baguettes de sillimanite dans le grenat indiquent une déstabilisation du grenat en sillimanite (figure 2). Les plages de FK contiennent de nombreux cristaux de sillimanite, se retrouvant parfois en inclusion dans une auréole coronitique. Au MEB, cette texture coronitique entre le spinelle et les FK, est constituée de saphirine et du silicate d'alumine décrit ci-dessus (figure 3).

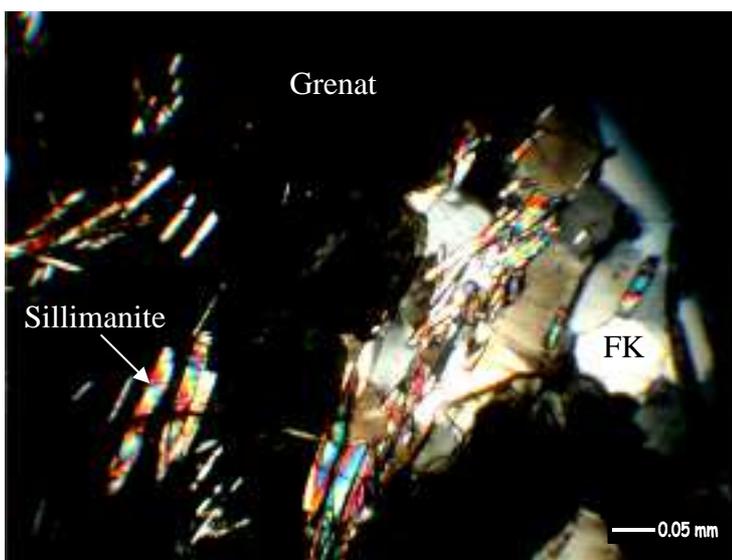


Figure 2 : Inclusion de sillimanite dans le grenat et le FK (Photo en lumière polarisée, LPA).

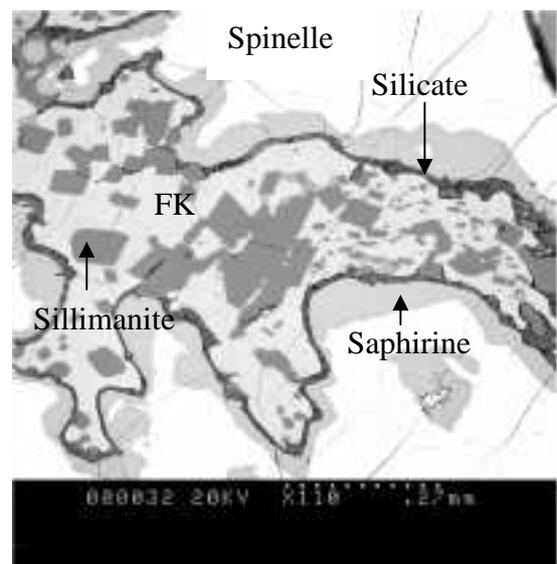


Figure 3 : Texture coronitique composée de saphirine et d'un silicate d'alumine développée entre le spinelle et le FK (photo MEB).

III-1-2-2: Gneiss feldspathique à biotite et corindon (127-4)

Description minéralogique :

- Orthose: sous forme de petits cristaux xénomorphes en mosaïque constituant l'essentiel de la matrice. La plupart d'entre eux contiennent des perthites.
- Corindon : présence d'un monocristal automorphe et fracturé. Le corindon existe aussi sous la forme de petits cristaux squelettiques xénomorphes et allongés.
- Micas : ce sont généralement des baguettes plus ou moins bien cristallisées de biotite disposées suivant la linéation. Il existe aussi un autre type de biotite, plus massif et ne suivant pas la même linéation. Il semble que les biotites soient contemporaines des FK.
- Spinelle : petits cristaux xénomorphes entre les grains de FK. Ils présentent des golfes de corrosion et de nombreuses inclusions feldspathiques.
- Plagioclase : cristaux xénomorphes maclés peu abondants.
- Grenat : présence d'un seul monocristal automorphe et fracturé.
- Opaque, monazite et zircon : assez abondant dans cette lame (environ 5% au total).

Description texturale :

Les cristaux squelettiques de corindon sont assez particuliers. Ils sont toujours associés aux cristaux de biotite et soulignent la linéation (figure 4). Ils ne se trouvent que dans des lits bien précis, et semblent recouper la matrice feldspathique, ce qui indiquerait que leur cristallisation a été plus tardive. Les cristaux de spinelle présentent des figures de déstabilisation avec des cristallisations de FK en remplacement. Les cristaux de corindon et de grenat sont automorphes et ne présentent pas de texture particulière (figure 5).

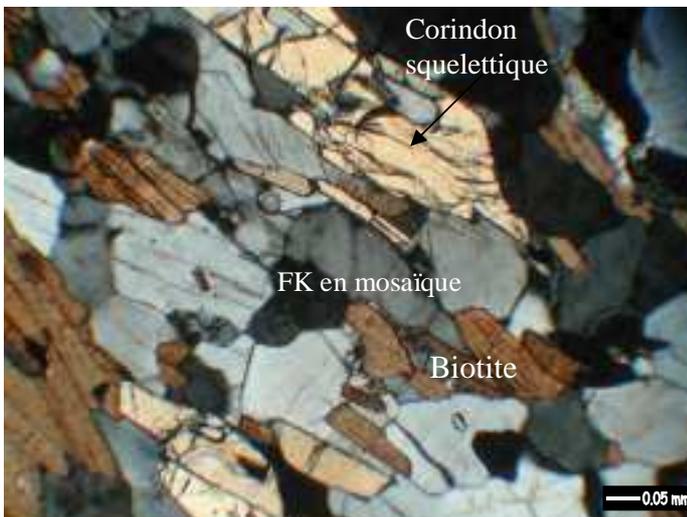


Figure 4: Cristaux de corindon squelettique, de biotite et de FK (photo LPA).

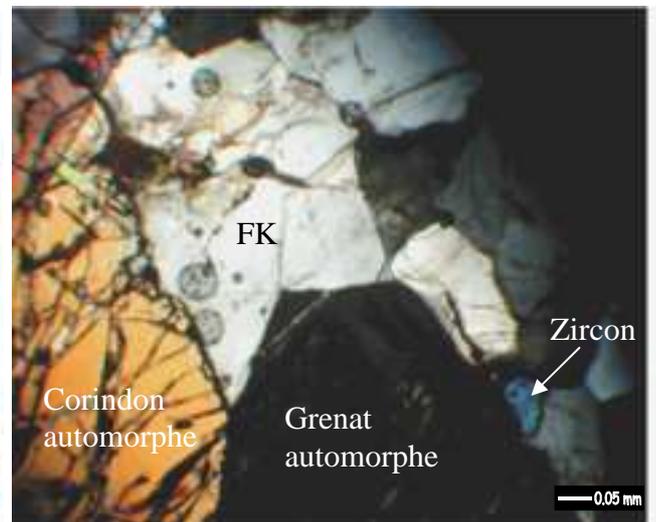


Figure 5 : Monocristal de corindon et de grenat dans une matrice feldspathique (photo LPA).

III-1-2-3: Gneiss biotitisés (S3/S2)

Description minéralogique :

- Biotite : cristaux automorphes en lamelle.
- Feldspath : grande plage xénomorphe avec 50% de FK et 50% de plagioclase imbriqués en mosaïque. Ils constituent la mésostase.
- Grenat : gros cristaux fracturés automorphes. Contient souvent des inclusions en baguette de sillimanite.
- Spinelle : cristaux xénomorphes, présentant des golfes de corrosion et une auréole coronitique.
- Sillimanite : en auréole réactionnelle xénomorphe autour du spinelle et parfois en inclusion automorphe dans la biotite et le grenat.
- Corindon : Cristaux généralement automorphes, de plusieurs millimètres de long, fracturés, mais peu abondants. Ils se rencontrent en contact avec le spinelle.

Description texturale :

Sur cette lame, le spinelle est en déséquilibre et il est remplacé par la sillimanite en auréole coronitique (figure 6). Le corindon réagit lui aussi avec le spinelle. Il remplace progressivement le spinelle en déséquilibre (figure 7).

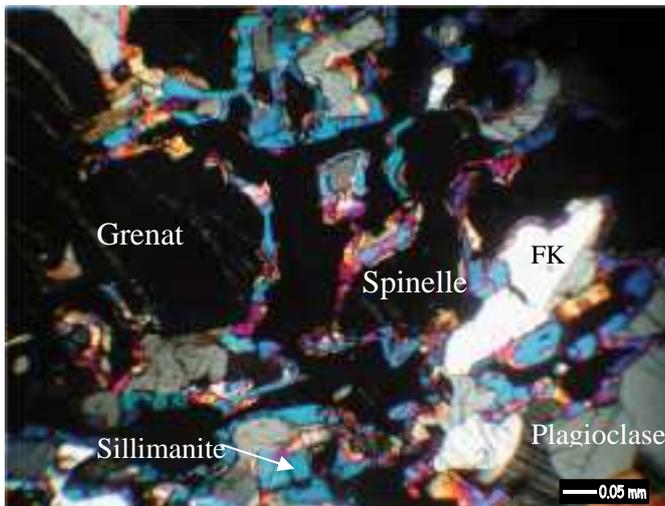


Figure 6 : Réaction coronitique de la sillimanite entre le spinelle et le feldspath (photo LPA).

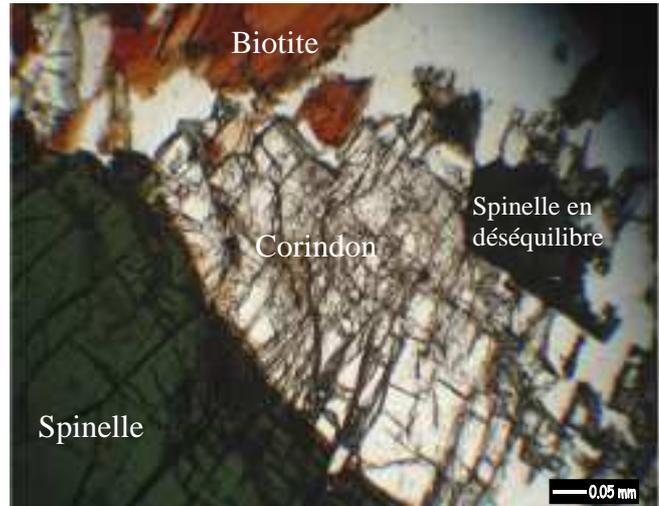


Figure 7 : Transformation partielle du spinelle en corindon (photo en lumière naturelle, LN).

III-1-2-4: Biotitite à minéraux (SA2/ S15)

Description minéralogique :

- Biotite : cristaux en lamelles automorphes et xénomorphes.
- Spinelle : en grande plage xénomorphe avec souvent des inclusions de sillimanite, mais aussi sous forme de petits cristaux automorphes en inclusion dans le corindon.
- Corindon : un monocristal automorphe, très fracturé, avec pinacoïde.
- Feldspath potassique : aspect altéré, en grande plage xénomorphe constituant la matrice. Souvent recouvert par de la biotite ou en réaction avec elle.
- Grenat : un seul monocristal automorphe fracturé et qui contient de nombreuses inclusions.

Description texturale :

Le spinelle se rencontre en inclusion dans le corindon (figure 8). Il se rencontre aussi au contact entre le corindon et le FK en réaction coronitique. Le spinelle a donc cristallisé après le corindon sur cette lame (figure 9). Il est accompagné d'une fine couche de mica. Le mica remplace aussi le FK (figure 11). Le grenat et le spinelle contiennent de nombreuses inclusions, dont la plupart sont des cristaux de sillimanite ou de biotite (figure 10).

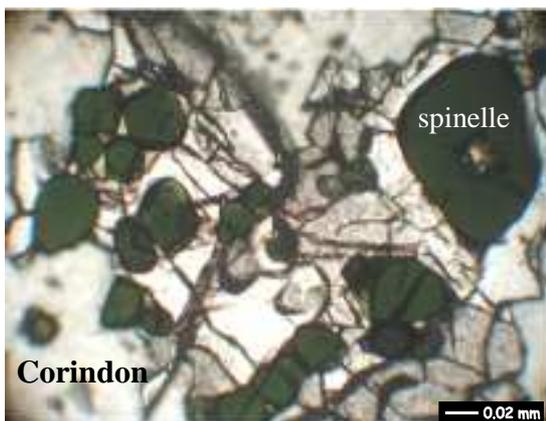


Figure 8 : Inclusion de spinelle dans du corindon (photo LN).

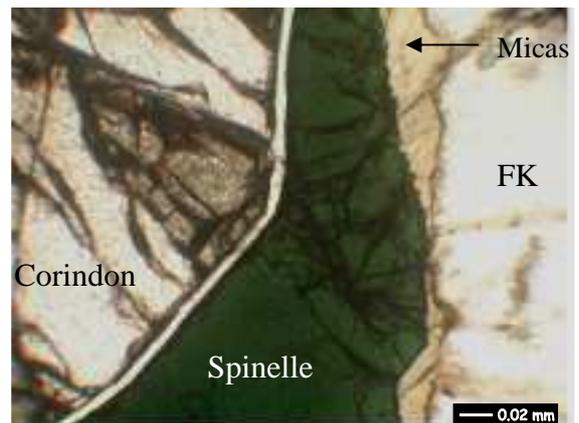


Figure 9: Réaction entre le FK et le corindon avec apparition de spinelle et de micas (photo LN).

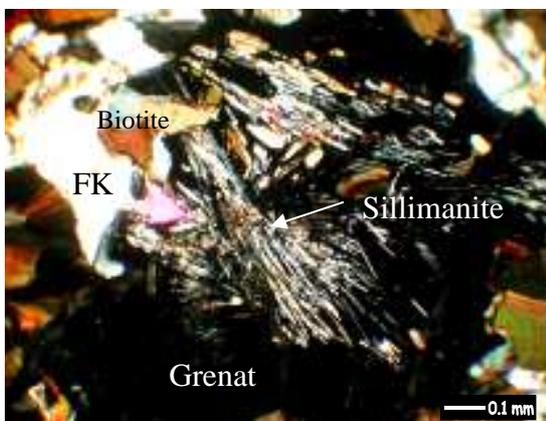


Figure 10 : Inclusion de sillimanite et de biotite dans du grenat (photoLPA).

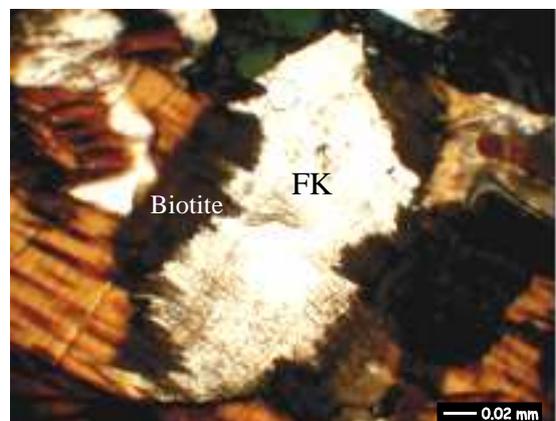


Figure 11 : Cristallisation de biotite à partir du FK (photo LN).

III-1-2-5: Marbre à minéraux : cipolin (127-9)

Description minéralogique :

- Calcite : grande plage xénomorphe en mosaïque constituant en majeure partie la matrice.
- Forstérite : porphyroblaste en inclusion dans les plages de calcite ou en inclusion dans le spinelle. Souvent entourée d'une auréole réactionnelle.
- Spinelle : un seul gros cristal en cours de déstabilisation. Ce cristal se trouve au contact avec les carbonates, avec néoformation de plusieurs minéraux réactionnels.
- Musgravite ($\text{BeMg}_2\text{Al}_6\text{O}_{12}$): cristaux automorphes allongés et xénomorphes tabulaires réactionnels avec le spinelle. Ils ne se rencontrent qu'au contact spinelle-carbonate.
- Dolomite : se rencontre sous forme d'exsolution dans la calcite et en réaction avec le spinelle ou la forstérite.
- Diopside : cristaux xénomorphes en réaction coronitique avec la forstérite. Il est souvent accompagné de dolomite et de mica.
- Autres minéraux : micas (margarite et phlogopite), apatite, pyrite : en très faible quantité et en très petite taille sous la forme d'inclusions ou dans des couronnes réactionnelles.

Description texturale :

Au MEB, les textures coronitiques sont abondantes et variées. La première réaction est celle entre la forstérite et la calcite. Les forstérites sont ainsi entourées d'une première couronne constituée de diopside, de dolomite et parfois de margarite, et d'une deuxième de dolomite pure (figure 12). La deuxième réaction est celle entre le spinelle et les carbonates. On peut observer à leur contact la présence de baguette de musgravite associé généralement à de la dolomite (figure 13). La troisième réaction est celle entre le spinelle et la forstérite. Entre ces deux minéraux, se trouve un mélange constitué de diopside, dolomite, phlogopite (2%<) et d'apatite (1%<).

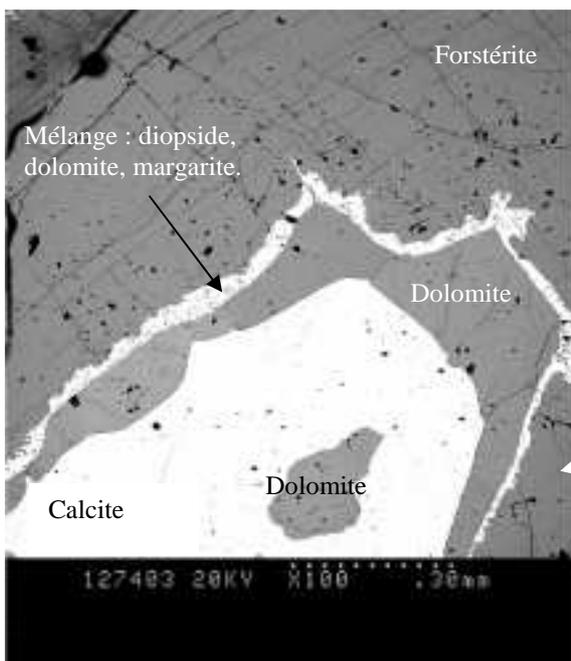


Figure 12 : Réaction coronitique entre la forstérite et la calcite (photo MEB).

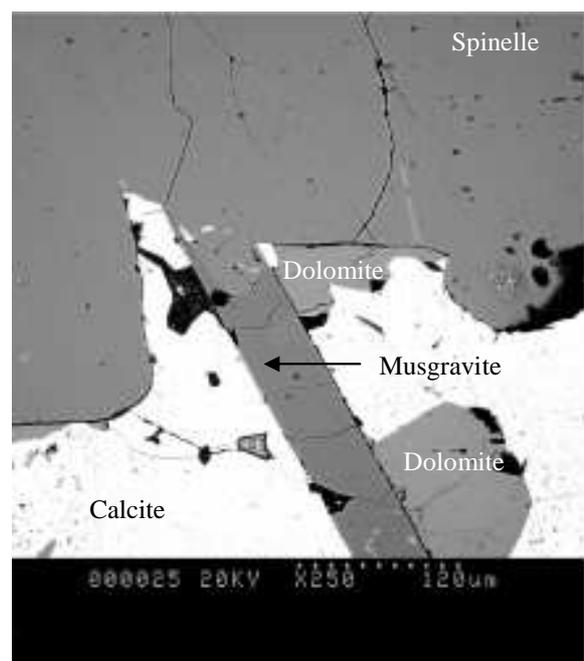


Figure 13 : Réaction coronitique entre la calcite et le spinelle (photo MEB).

III-1-2-6: Veine à biotite et grenat (S1/125-17)

Ces veines se rencontrent soit intercalées dans la foliation des gneiss (parallèle) comme dans S1, soit recoupant les gneiss leptynitiques (sécant à la foliation) comme dans 125-17.

Description minéralogique :

- Quartz : uniquement dans 125-17 sous forme de plage plus ou moins grande xénomorphe. Il semble que ces plages constituent la matrice de la lame et que les biotites les aient recouvertes partiellement.
- Biotite : très abondante dans la lame, avec de grandes lamelles automorphes. Elles s'alignent dans le plan de foliation et recouvrent les plages de quartz (125-17).
- FK: en plage de cristaux xénomorphes et imbriqués en mosaïque (S1).
- Grenat : gros cristaux automorphes et fracturés.
- Spinelle : cristaux xénomorphes avec golfe de corrosion et nombreuses inclusions. Ils sont imbriqués en mosaïque avec les FK.
- Zircon : petits cristaux globulaires allongés entre les cristaux de biotite (environ 2%).
- Corindon : uniquement dans S1 avec seulement deux petits cristaux automorphes et fracturés.

Description texturale :

Les biotites ne présentent pas d'inclusion de FK ou de quartz et les recoupent le plus souvent. Elles ont donc cristallisées plus tardivement. De même pour les grenats qui semblent être contemporain des biotites (figure 14). Les spinelles présentent des caractéristiques de déstabilisation et se sont développés en même temps que les FK (figure 15). Les corindons semblent plutôt être contemporains des biotites (figure 15) et donc plus tardifs que les autres minéraux de la lame.

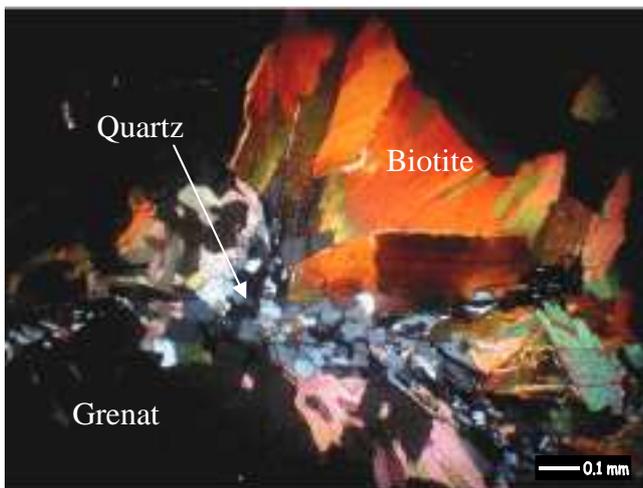


Figure 14 : Cristaux de grenat, biotite et de quartz dans la lame 125-17 (photo LPA).

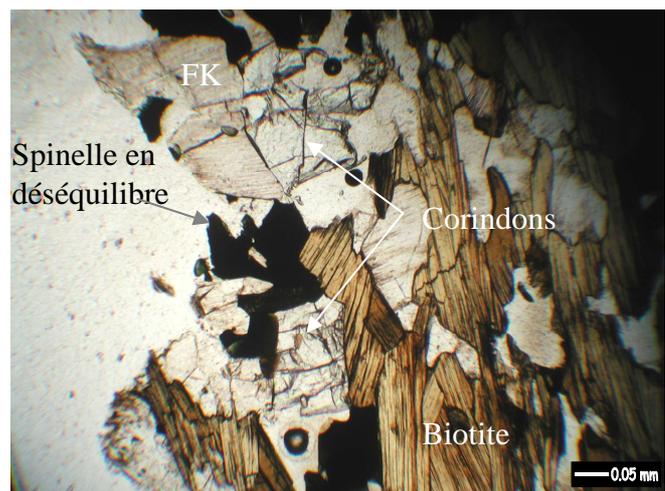


Figure 15 : Cristaux de corindon, spinelle, biotite et FK dans la lame S1 (photo LN).

III-1-3 Analyses chimiques des minéraux

Suite à l'étude microscopique, plusieurs minéraux de chaque lame polie ont été analysés à la microsonde électronique.

III-1-3-1: Les micas

L'annexe B-8 présente les différentes teneurs des éléments chimiques en % poids d'oxyde pour les micas et l'annexe B-9 en présente les formules structurales. On peut constater que ces micas sont assez riches en fer et en magnésium. Il s'agirait donc plutôt de micas de type biotite variant entre le pôle ferreux de l'annite et du pôle magnésien de la phlogopite. La figure 16 représente la teneur en aluminium octaédrique (VI) en fonction de $XMg = Mg/(Mg+Fe)$.

Pour les gneiss et les veines tardives, on peut constater que leur teneur en Al VI est relativement faible (0,1-0,3). En revanche, XMg varie relativement (0,4-0,7). Pour les biotites, on observe des teneurs en Al VI assez importantes (0,6 – 0,8) et un XMg élevé et plus restreint (0,5-0,7). Les micas présents dans les cipolins sont des phlogopites avec des teneurs en Al VI et en X Mg relativement restreintes.

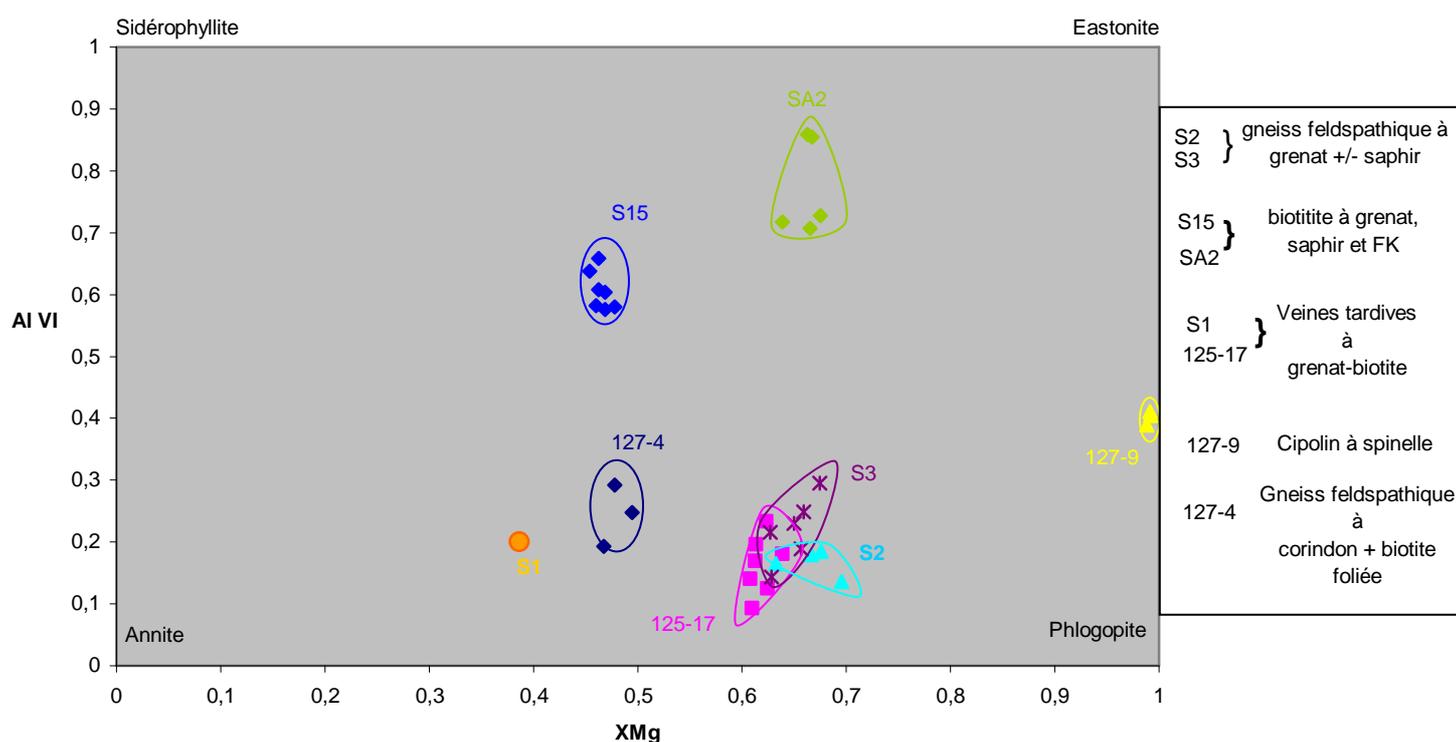


Figure 16 : Diagramme Al VI-XMg pour les micas.

La figure 17 représente le diagramme titane en fonction de Al VI. On peut remarquer que les gneiss et les veines tardives se regroupent dans un même domaine, caractérisé par de fortes teneurs en titane (0,6-0,75) pour de faibles teneurs en Al VI (0,1-0,3). Les biotites contiennent beaucoup moins de titane et ont des teneurs très variables (0,01-0,5) pour des teneurs plus élevées en Al VI (0,6-0,85). Les phlogopites des cipolins ne contiennent pratiquement pas de titane.

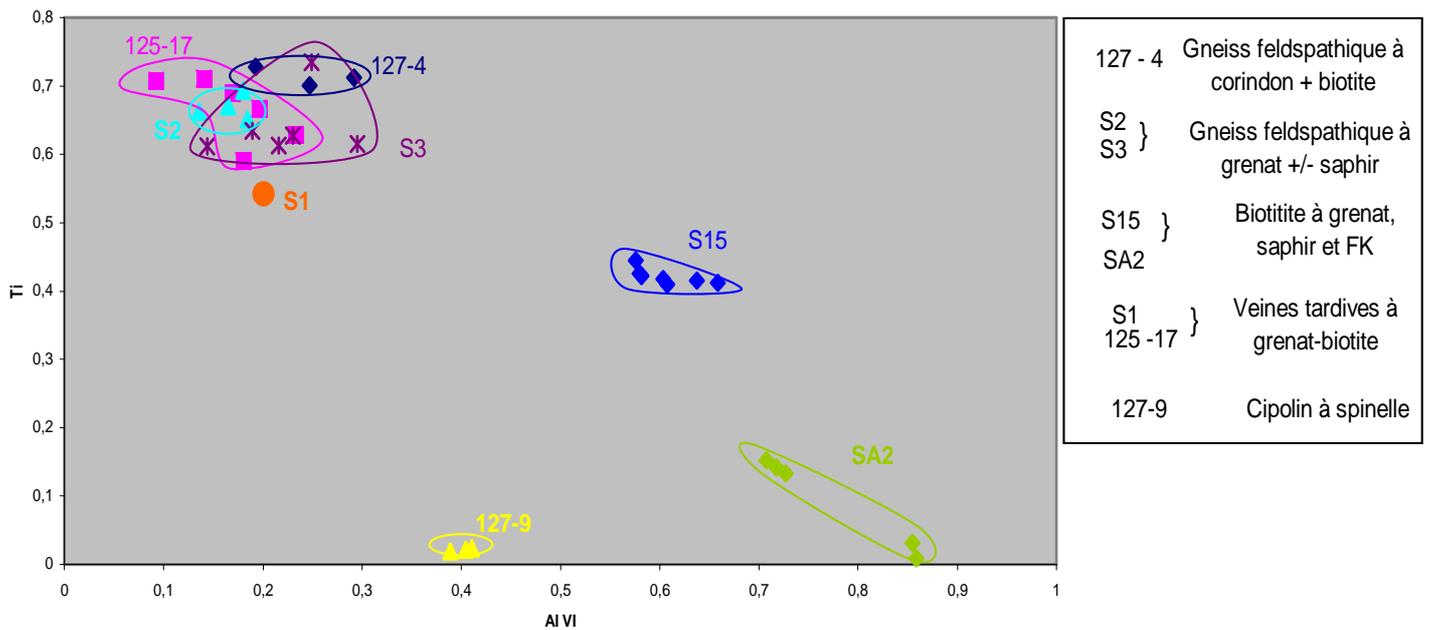


Figure 17 : Diagramme Al VI -Ti pour les micas.

III-1-3-2: Les feldspaths

Les feldspaths rencontrés sont le feldspath potassique et le plagioclase. Le plagioclase se présente sous forme de monocristaux ou d'exsolutions perthitiques dans les FK. L'annexe B-10 résume sous forme de tableau les différentes analyses chimiques effectuées sur plusieurs feldspaths et l'annexe B-11 en présente les formules structurales. La figure 18, est un diagramme répartissant les compositions chimiques suivant les pôles potassique (orthose), calcique (anorthite) et sodique (albite). La plupart des gneiss et des biotitites contiennent des feldspaths constitués entre 70 et 90 % moles d'orthose. Seul les gneiss leptynitiques à grenat sont composés d'andésine (60 % moles Ab). Les perthites contenues dans les FK des gneiss feldspathiques (lame 127-4), ont une composition similaire (andésine) à celle des plagioclases issus des gneiss leptynitiques (S2).

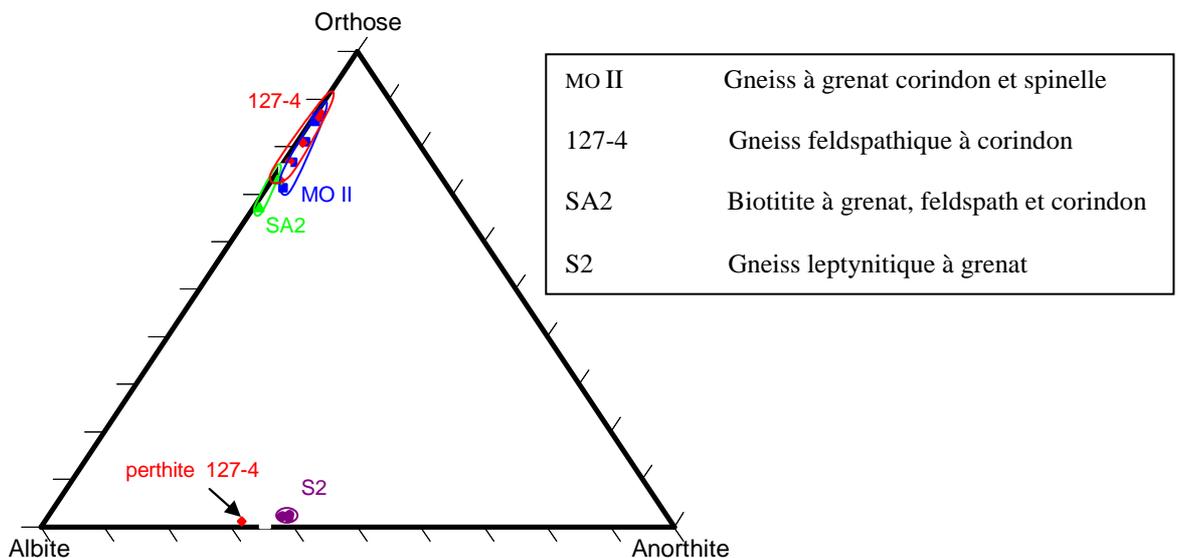


Figure 18: Diagramme Albite- Anorthite- Orthose des feldspaths.

II-1-3-3: Les grenats

Les grenats sont présents dans tous les faciès. Ils sont généralement automorphes et assez bien conservés. L'annexe B-12 résume sous forme de tableau les différentes analyses chimiques effectuées sur plusieurs grenats de chaque lame et l'annexe B-13 en présente les formules structurales. La figure 19, est un diagramme répartissant les compositions chimiques suivant les pôles magnésien (pyrope), ferreux Fe^{2+} (almandin), et ferrique Fe^{3+} (andradite).

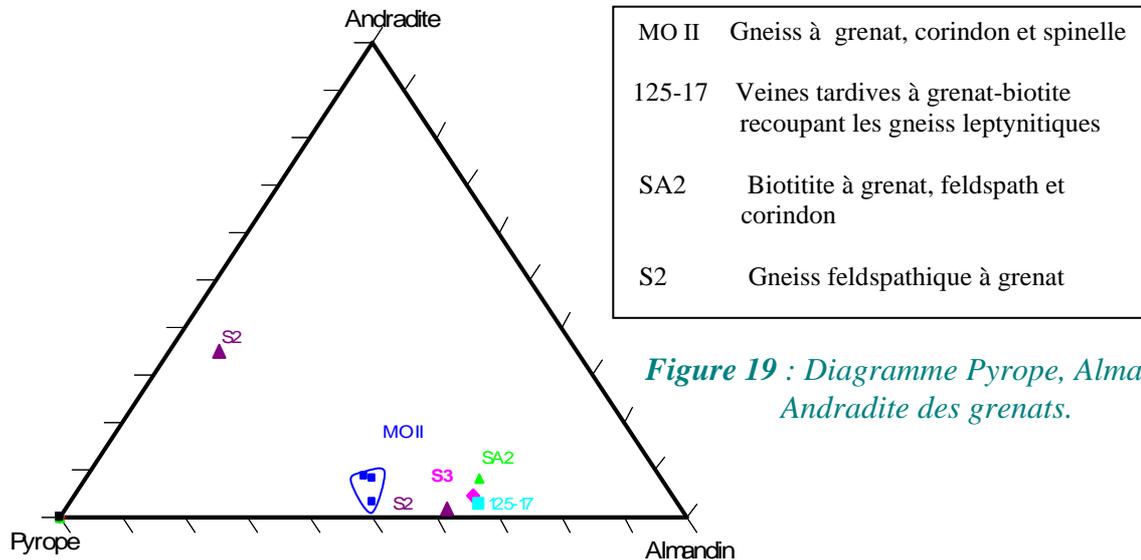


Figure 19 : Diagramme Pyrope, Almandin, Andradite des grenats.

L'ensemble des points se répartit le long de la droite Pyrope-Almandin et ne contient donc pratiquement pas de Fe^{3+} . Les grenats des gneiss possèdent autant de magnésium que de Fe^{2+} . Dans les gneiss leptynitiques, les grenats ont des compositions plus proches de l'almandin (60-70 % de Fe^{2+} et 40-30% de Mg). Un grenat d'un gneiss leptynitique (S2) présente une composition intermédiaire entre une andradite et un pyrope : 5 % de Fe^{2+} , 60% de Mg et 35% de Fe^{3+} . L'échantillon S2 contient donc deux types de grenats.

II-1-3-4: Les spinelles

Les observations microscopiques ont révélé que les spinelles étaient généralement en déséquilibre (aspect xénomorphe, golfe de corrosion, inclusions ...) avec le corindon et la sillimanite. Leur couleur verte nous indique qu'il s'agit probablement de la variété hercynite. L'annexe B-14 résume sous la forme d'un tableau les différentes analyses chimiques effectuées sur plusieurs spinelles et l'annexe B-15 en présente les formules structurales. La figure 20, représente les compositions chimiques suivant les pôles ferreux (hercynite), magnésien (spinelle) et de zinc (gahnite) de ces spinelles. L'ensemble des points se dispose le long de la droite spinelle-hercynite. Ils ne contiennent donc pratiquement pas de zinc (<10%). La plupart des points se concentrent vers le pôle hercynite. Leur composition s'échelonne entre 50%-80% de Fe^{2+} et 50%-20% de Mg. Seul les spinelles issus des veines tardives (S1) ont des compositions franchement différentes. Leur composition est purement magnésienne (variété spinelle au sens strict).

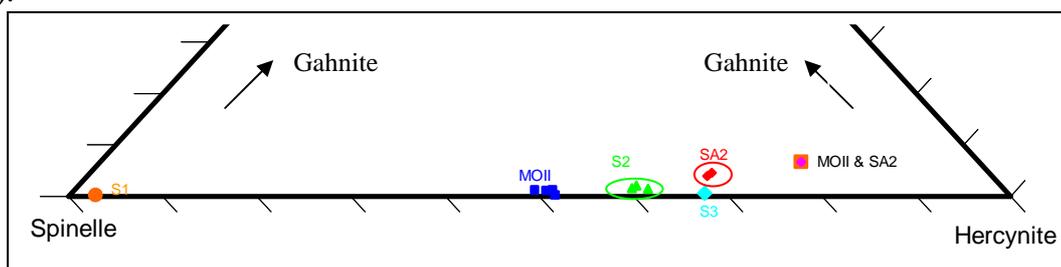


Figure 20 : Diagramme Spinelle, Hercynite, Gahnite des spinelles.

III-1-3-5: La musgravite

La musgravite est un minéral rare de formule : $\text{BeMg}_2\text{Al}_6\text{O}_{12}$ décrit uniquement en Australie, Antarctique, Sri Lanka (Kiefert et Schmetzer, 1998) et à Madagascar (Devouard et al., 2002). A Madagascar, la musgravite a été décrite dans des sakénites (Annexe A) composées principalement d'anorthite, de spinelle, de saphirine, de corindon et de phlogopite. Les auteurs proposent que cette musgravite soit le résultat de la percolation de fluide métasomatique associée à des pegmatites riches en béryllium, rencontrés fréquemment dans la zone de cisaillement de Ranatsora (région de Sakena, Sud Est de Madagascar).

A Sahambano, la musgravite se rencontre dans les marbres à minéraux (cipolin). Elle se présente sous la forme de baguettes bien cristallisées au contact du spinelle et de la calcite ou de plages xénomorphes incluses au sein des monocristaux de spinelle. Le tableau 3 présente une analyse réalisée à la microsonde électronique sur ce minéral. Le poids d'oxyde est converti en nombre d'anions calculés sur une base de 24 oxygènes. L'analyse chimique révèle une composition de musgravite et non de tafféite.

Oxyde	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	BeO	MgO	MnO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O	Total
Poids d'oxyde	0	72,97	0	0	0,62	6,1	19,51	0,01	0,02	0	0	0	99,24
Nombre d'anions	0	23,82	0	0	0,14	4,05	8,05	0,002	0,006	0	0	0	
Musgravite idéale		24				4	8						
Tafféite idéale		24				3	9						

Tableau 3: Analyse microsonde électronique d'une musgravite du cipolin de Sahambano.

En effet, la musgravite a longtemps été confondue avec la tafféite dont la formule chimique est très proche : $\text{BeMg}_3\text{Al}_8\text{O}_{16}$. La spectroscopie Raman permet cependant de les distinguer (Kiefert et Schmetzer, 1998 ; annexe B-16). Le spectre Raman réalisé sur ce minéral nous a permis de caractériser la musgravite (figure 21). En effet, on retrouve les pics caractéristiques de la musgravite décrit par Kiefert et Schmetzer (1998) à : 326, 412, 443, 489, 660, 713 et surtout à 579 cm^{-1} (pic déterminant qui permet la distinction entre les deux espèces).

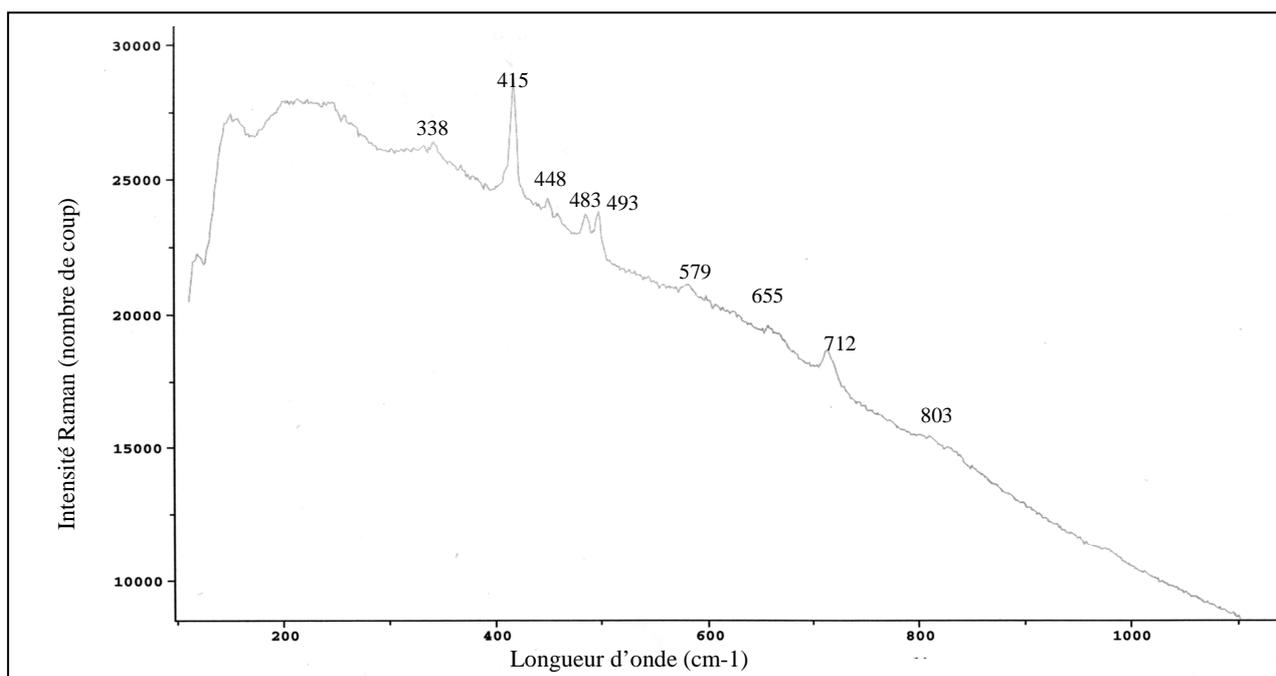


Figure 21 : Spectre Raman de la musgravite de Sahambano.

III-1-4 : Le géothermomètre à grenat-biotite

Holland & Powell (1998) ont établi un programme de calcul de géothermométrie. Le principe est basé sur le fait que les teneurs en XMg dans le grenat et la biotite, varie en fonction de la température et suivant la réaction : Phlogopite + Almandin \rightarrow Annite + Pyrope. Ce programme a été appliqué à plusieurs échantillons de Sahambano contenant des biotites inclus dans des grenats ou en contact avec ceux-ci. Ces échantillons sont soit des veines à grenat-biotite, soit des biotites à grenat et corindon. La présence de sillimanite dans nos lames nous permet d'affiner le domaine défini sur Sahambano.

Sur la figure 22, on peut constater que les températures de cristallisation des grenats-biotites sont comprises entre 650 et 750°C. Ces températures correspondent à l'intervalle de température déjà défini pour le faciès granulite dans les roches métamorphiques à sillimanite du Sud Est de Madagascar soit 750 +/- 50°C (Nicollet, 1986; Rakotondrazafy 1995; Pili 1997). L'épisode métamorphique qui a affecté les roches de Sahambano est donc le même que celui qui a affecté tout le Sud de Madagascar lors de l'orogénèse Panafricaine, il y a environ 550 Ma.

L'absence de réaction texturale ne nous permet pas d'affiner le domaine P-T défini sur Sahambano, notamment en ce qui concerne l'intervalle de pression. Or nous venons de voir que les roches métamorphiques de Sahambano et du Sud Est de Madagascar étaient contemporaines. Il est donc possible de corréliser les données P-T de Sahambano à celles définies entre autres par Pili (1997). Pour la zone de Ranatsora (région de Ihosy), le type de métamorphisme évoqué est celui d'une haute température (700-750°C) et d'une basse pression (4-5 kbars).

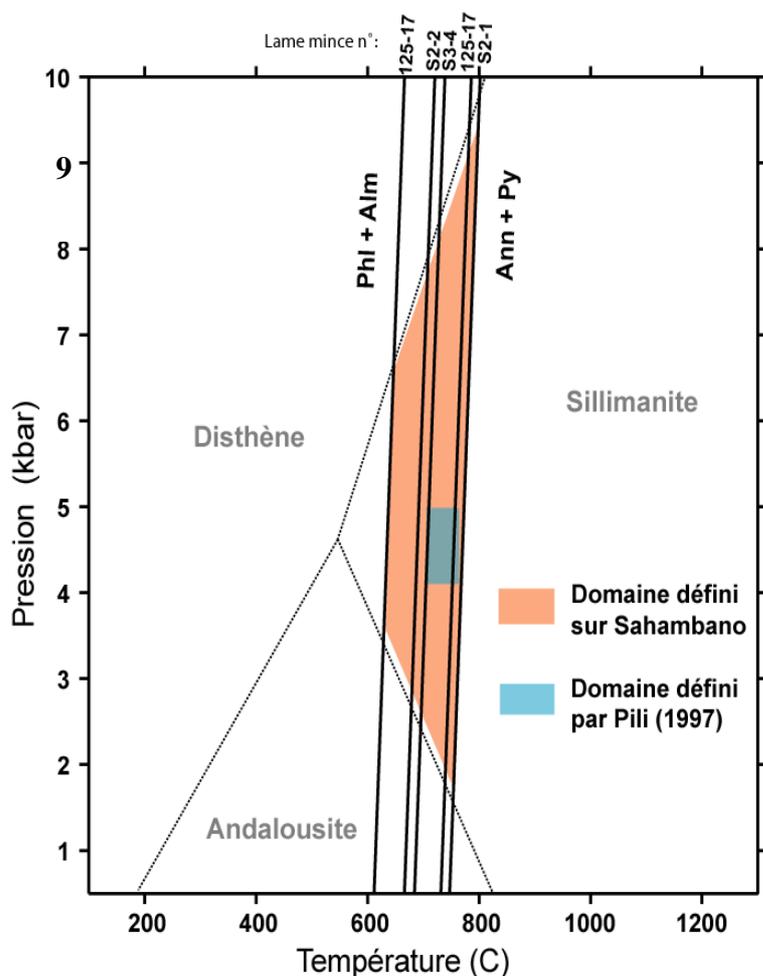


Figure 22 : Diagramme Pression-Température, établi à partir du géothermomètre Grenat-Biotite d'après la méthode de Holland et Powell (1998).

III-2 Etude minéralogique des corindons

III-2-1 Description macroscopique

Les cristaux de corindon présentent deux habitus différents : le prisme hexagonal court et le prisme hexagonal allongé. Certains des prismes se terminent par la dipyramide hexagonale et le rhomboèdre chapeauté par le pinacoïde et d'autres, uniquement par le pinacoïde (figure 23). De rares cristaux sont interpénétrés (figure 23). Les couleurs les plus fréquentes sont le rose à mauve et le violet à bleu. D'autres couleurs plus rares comme le rose-orangé, le brun, le rouge, le vert et l'incolore ont aussi été rencontrés dans le gisement. Les prismes aplatis peuvent prendre des couleurs orange, rose, violet, rouge ou bleu (figure 23). Il en est de même pour les prismes allongés. Il n'y a donc aucune relation entre la couleur des cristaux et leurs habitus. L'annexe B-17 représente la répartition des corindons issus d'un cubage suivant différents paramètres dont la couleur.

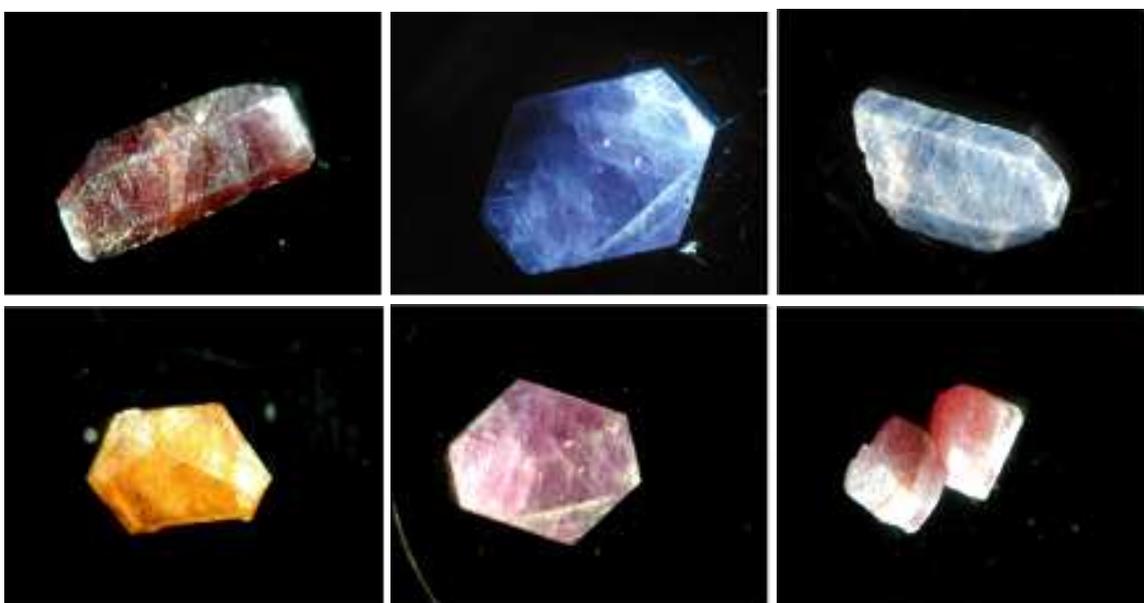


Figure 23 : Cristaux de corindon de Sahambano d'habitus, de taille et de couleur différents. Largeur des photos : 2cm.

Certains des cristaux admettent deux couleurs voir plus, sur un même cristal. Ces cristaux multicolores représentent environ 5% de l'ensemble des corindons du gisement. Sur un cristal, le passage d'une couleur à une autre se fait soit progressivement (quelques millimètres) suivant l'allongement du prisme hexagonal (axe c), et dans ce cas précis, la variation de couleur peut même s'observer sur le plan du pinacoïde (figure 24, B et C), soit de façon instantanée (figure 24, A). Dans ce dernier cas, on peut passer brutalement d'une couleur rose clair ou incolore à rosé, à une couleur bleue. La zone de passage d'une couleur à une autre indique une cristallisation en 2 stades : généralement, le premier stade se matérialise par le développement du prisme hexagonal et du pinacoïde, le deuxième stade, débute par la croissance du nouveau cristal suivant le pinacoïde du premier qui a donc servi de surface de germination. Le cristal du deuxième stade généralement bleu, présente le prisme hexagonal court ou allongé, terminé par la dipyramide hexagonale et le rhomboèdre, et enfin le pinacoïde.



Figure 24 : Corindons polychromes : A- prisme hexagonal présentant une croissance en deux stades (cristal rose puis bleu) avec une zone de contact brutal ; B- 3 prismes hexagonaux avec un changement de couleur progressif; C- prisme hexagonal aplati présentant une zonation de couleur suivant le pinacoïde.

III-2-2 Description microscopique (étude au MEB)

Plusieurs échantillons de corindons de différentes couleurs ont été montés en sections polies. L'étude microscopique de ces cristaux nous a permis de caractériser et vérifier :

- l'homogénéité chimique des cristaux par leur observation en électrons rétrodiffusés : les cristaux observés ne présentent pas de contraste chimique particulier, ils sont homogènes.
- l'état de fracturation des corindons : ils sont généralement fortement fracturés et ils présentent de nombreuses traces d'arrachements.
- la présence de cavités fluides : l'observation en 3D des cristaux n'a révélé aucune trace de cavités fluides.
- la présence d'inclusions solides. Celles-ci sont fréquentes et elles sont consignées dans le tableau 4.

Sections polies	Couleurs des cristaux	Nature des inclusions solides									
		Sp	Pl	FK	Sil	Barytine	Zr	Micas	Cd	Diaspore	Qz
S11	Marron-jaune-violet		+	+	+	+	+				
S12	Bleu gris									+	
S21	Violet foncé										
S22	Rose foncé	+						+	+		+
S31	Rose-orangé		+	+							
S32	Jaune-marron-orangé		+	+	+						
S41	Orange-rosé			+	+			+			
S42	Violine à rose clair										
S51	Rose-orangé										
S52	Rouge										
S1'A	Orangé	+		+	+						
S1'B	Vert de gris			+			+				
S2'A	Rouge										
S2'B	Rose										

Légende : Sp=spinnelle, Pl=plagioclase, FK=orthose, Sil=sillimanite, Zr =zircon, Cd=cordiérite, Qz=quartz.

Tableau 4 : Inclusions solides observées au MEB dans des corindons de différentes couleurs.

Les inclusions solides peuvent se diviser en 3 catégories :

- Les inclusions situées sur la bordure du cristal (figure 25). Ces inclusions font en fait partie de la gangue qui contient le corindon. Cette paragenèse est généralement constituée de feldspath potassique, de plagioclase, de sillimanite, d'un mélange d'oxyde (constitué de silice, d'alumine et de fer) et de spinelle. Ces minéraux de bordure sont identiques à ceux rencontrés dans les lames minces de roches.

- Les inclusions situées à l'intérieur des corindons. Il s'agit du spinelle et du FK (figures 26 et 27). Ils sont parfois accompagnés d'autres minéraux plus rares comme la cordiérite, le mica, la sillimanite ou le quartz. Le quartz n'a pas cristallisé en même temps que le corindon car on peut apercevoir une fracture qui a alimenté ce minéral de façon plus tardif.

On a également rencontré des inclusions de forme globulaire comme le zircon ou la barytine (figures 28 et 29). La barytine ne se trouve que dans la section SAH1 et elle est accompagnée de pyrite et d'un mélange constitué d'oxyde de silice, d'alumine et de fer. Certains zircons ont une taille supérieure à 30 microns et ils ne présentent pas de zonation. Cependant, un de ces zircons a présenté une croissance en deux étapes : une première phase qui doit correspondre à un zircon hérité (au cœur du cristal) et une deuxième phase, située à la périphérie du cristal, qui correspond à une recristallisation d'origine métamorphique. Entre les deux zones on distingue une auréole de dissolution qui est matérialisée par la présence de cavités.

- Les inclusions de type remplissage. D'autres inclusions minérales comme le diasprose (AlOOH), sont observées uniquement sous forme de remplissage secondaire dans des fractures (figure 30). Ces fractures sont dues à un réajustement du corindon à basse température, lors de sa remontée vers la surface.

III-2-3 Géochimie des corindons

III-2-3-1: L'origine de la couleur des corindons

Le corindon (Al_2O_3) est incolore mais ces leucosaphirs sont rares dans la nature. Le plus souvent ils sont colorés dans la gamme de couleur décrite à Sahambano qui apparaît être un gisement exceptionnel car tous les saphirs colorés sont concentrés sur un même site. La diversité de couleur est due à la présence d'impuretés (éléments chromophores) qui sont des éléments de transition comme le Fe, Cr et Ti. Ces éléments peuvent se substituer dans les sites octaédriques en remplaçant l'aluminium. Ils vont absorber une partie de la lumière visible (entre 400 et 700 nm) et laisser passer la lumière complémentaire. Ces longueurs d'onde seront responsables de la couleur de la gemme. Les valences des éléments (Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cr^{3+} , V^{3+} , Ti^{2+} , Ti^{4+}) jouent un rôle important pour la coloration des cristaux (Annexe A). D'une manière générale, la coloration peut être due à un mécanisme appelé transfert de charge (deux ions métalliques séparés par un atome d'oxygène vont échanger un électron) ou/et à une substitution à l' Al^{3+} . Dans le rubis, la couleur rouge est due au chrome qui se substitue aux atomes d'aluminium dans une proportion comprise entre 0,03 et 2% poids. La couleur bleue du saphir est due aux mécanismes de transfert de charge $\text{Fe}^{2+}\text{-O-Ti}^{4+}$. Le chrome est un élément en coordination octaédrique et il est à l'origine de nombreuses couleurs tels le pourpre, violet, le vert (avec le Ti^{3+}), l'orange à brun-orangé (avec le Fe^{3+}), le rose-orangé (padparadscha) et le rose.

III-2-3-2: La géochimie des éléments traces des corindons

Une série de 20 corindons colorés montés en sections polies a été analysé à la microsonde électronique. Chaque saphir a fait l'objet de plusieurs analyses (entre 3 et 10), suivant une ou des sections perpendiculaires aux bordures du cristal. Les analyses des différents saphirs sont reportées dans l'annexe A-18.

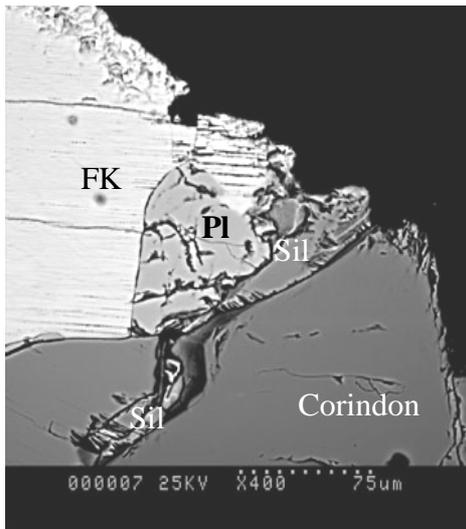


Figure 25 : Inclusions de FK, plagioclase et sillimanite en bordure d'un corindon (photo MEB).

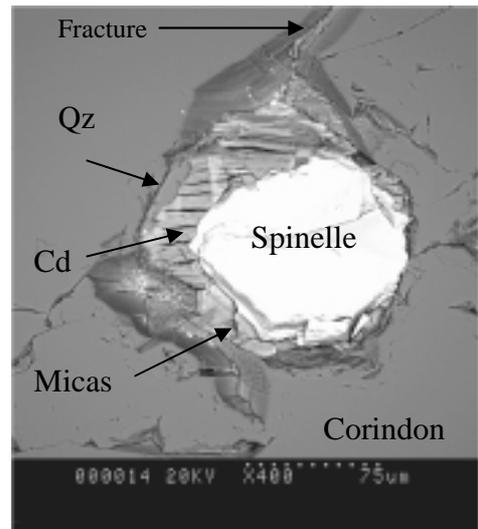


Figure 26 : Inclusions de spinelle, micas, quartz et cordiérite au cœur d'un corindon (photo MEB).

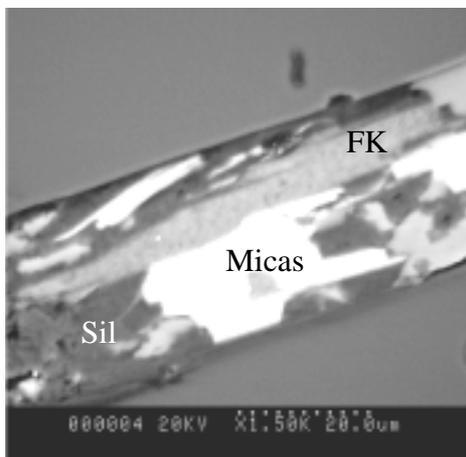


Figure 27 : Inclusion de sillimanite, FK et micas au cœur d'un corindon (photo MEB).

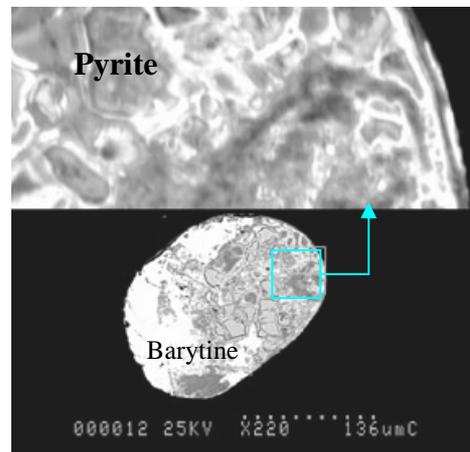


Figure 28 : Inclusion de barytine et de pyrite dans un corindon (photo MEB).

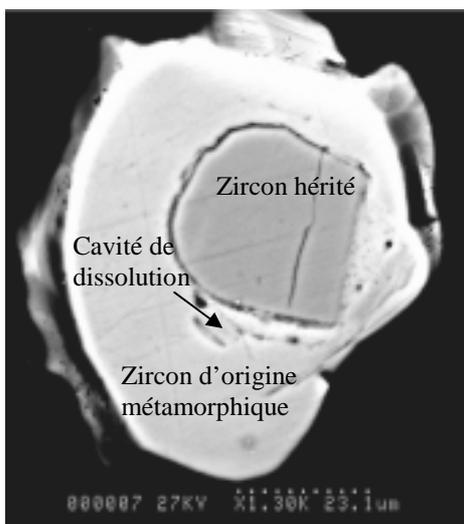


Figure 29 : Inclusion de zircon dans le corindon. Ce zircon présente deux phases de croissance (photo MEB).

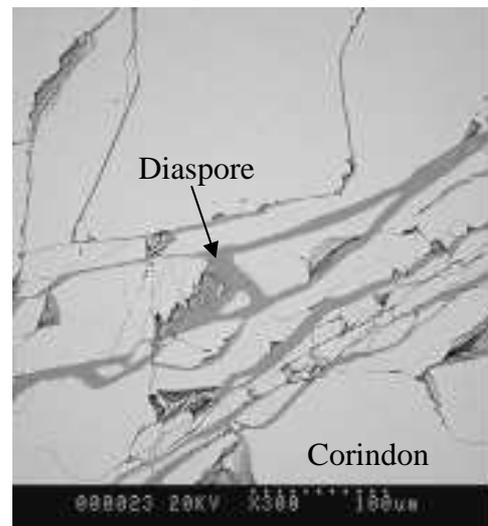


Figure 30 : Fractures secondaires remplies de diaspore recoupant le corindon (Photo MEB).

Les analyses chimiques montrent de faibles variations entre le bord et le cœur des cristaux. Les cristaux sont donc homogènes. Le taux de substitution en éléments traces est en moyenne égale à 4000 ppm (0,4%). La valeur maximale de substitution est de 5500 ppm (couleur fuschia) et la valeur minimale de 1800 ppm (incolore). Les substituants majeurs en coordination octaédrique sont le fer (4500 à 1730 ppm) et le chrome (2530 à 210 ppm). Ensuite, on distingue le gallium (240 à 54 ppm), le magnésium (140 à 50 ppm), et enfin des éléments disparates comme le titane et le vanadium qui sont souvent en quantité inférieure à la limite de détection de l'analyse (tableau 1). Sur les échantillons analysés, les teneurs en chrome sont toujours inférieures à celle du fer et les corindons doivent être appelés saphirs et non rubis.

Plusieurs diagrammes ont été réalisés afin d'établir des corrélations entre la couleur des corindons et leurs chromophores. Le diagramme Cr_2O_3 en fonction de $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Ga}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ permet de discriminer les différentes couleurs définies pour les saphirs de Sahambano (figure 31). La somme $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{Ga}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ est à peu près constante (2500 à 3500 ppm). La variation de la teneur en chrome est discriminante pour le passage d'une couleur à une autre. Les saphirs fuschia peuvent contenir jusqu'à 2500 ppm de chrome alors que les saphirs de couleurs bleus pastel à incolores ont des teneurs en chrome inférieures à 500 ppm. Entre ces deux extrêmes, s'échelonne toute la gamme de couleur représentée à Sahambano qui est fonction de la variation de la teneur en Cr_2O_3 : fuschia > rouge > violet > rose > rose-orangé > marron-jaune > violine à rose clair > rose foncé > bleu > orange > vert de gris > vert-marron > l'incolore > le bleu gris > le bleu clair. Ce critère chimique est remarquable.

La teneur en TiO_2 varie beaucoup en fonction des couleurs (de 20 à 200 ppm). Pour les couleurs représentées, c'est-à-dire celles dont la teneur en titane est supérieure à la limite de détection (20 ppm), on remarque que les couleurs rouges contiennent très peu de titane à l'inverse des verts de gris ou encore des violines à roses clair (figure 32). Le titane pourrait donc aussi jouer un rôle dans la coloration des corindons de Sahambano, mais il apparaît moins discriminant que le chrome (vu les faibles concentrations mesurées dans les cristaux).

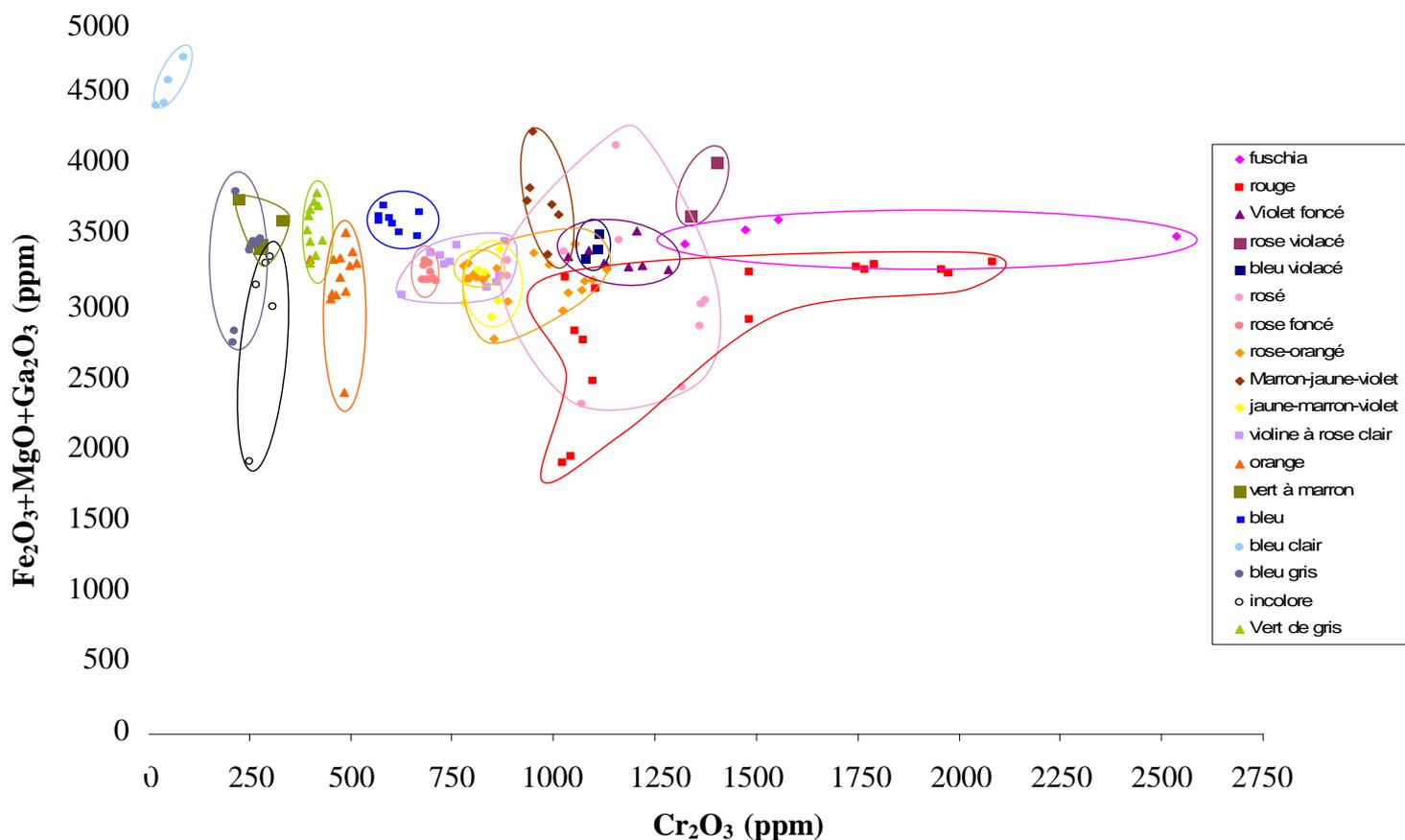


Figure 31 : Diagramme Cr_2O_3 - $\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO}+\text{Ga}_2\text{O}_3$ (en ppm) des différentes couleurs de corindon.

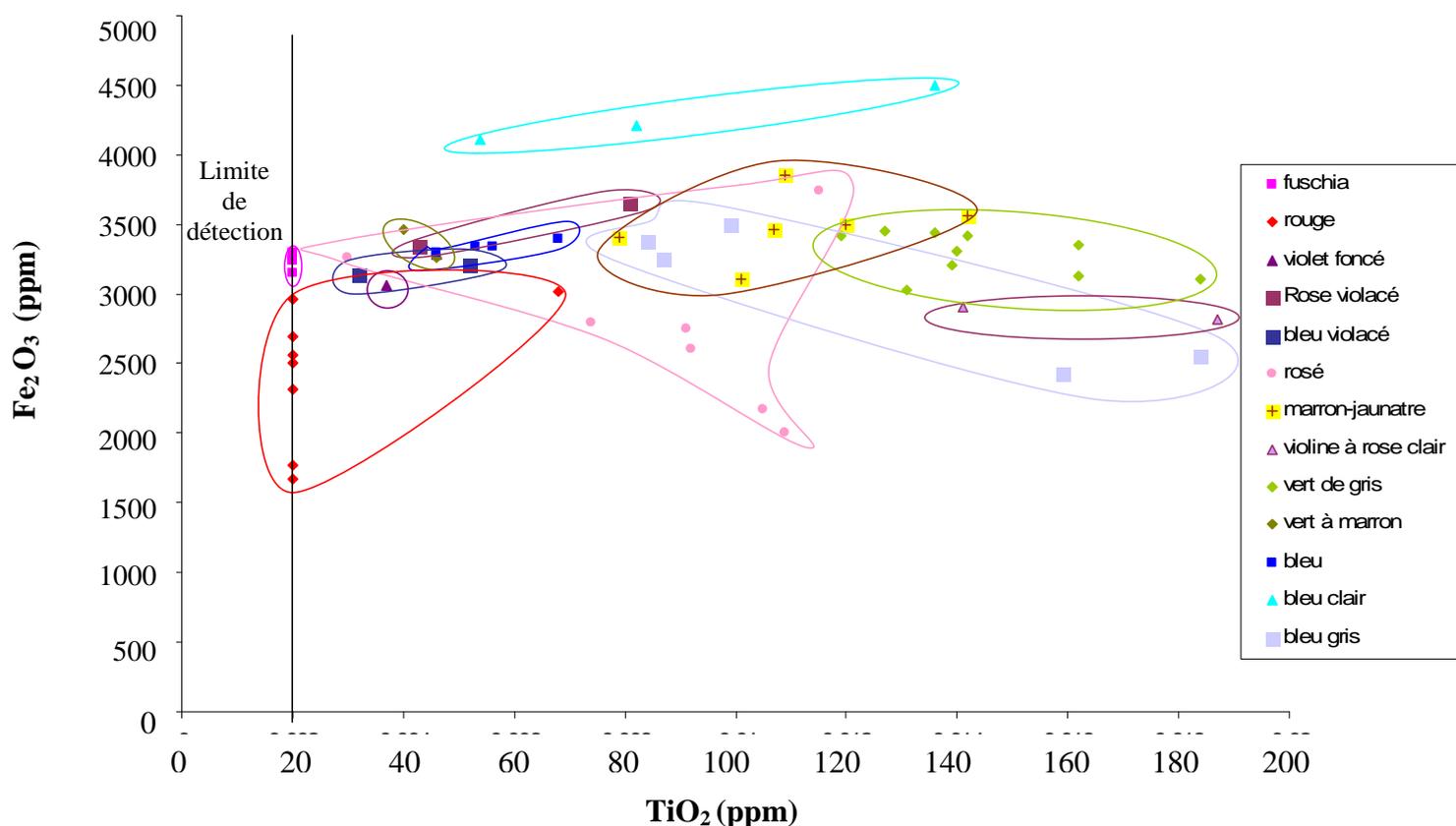


Figure 32 : Diagramme TiO_2 - Fe_2O_3 (en ppm) de différentes couleurs de corindon.

III-2-4 Origine des chromophores dans les saphirs.

Des analyses chimiques ont été réalisées sur différents types de roches afin de pouvoir discuter sur l'origine des éléments chimiques présents dans les corindons (chapitre IV discussion). Le tableau 5, présente le résultat de ces analyses pour les éléments majeurs (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 , MgO) et pour les éléments traces (Cr, Ga, Ni, Co).

Roche	Echantillon	Eléments majeurs (en % poids)				Eléments traces (en ppm)				Stade de formation
		Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	MgO	Cr	Ga	Ni	Co	
Gneiss feldspathique	S13	28,38	4,82	0,6	1,51	29,2	51,2	14,1	9,9	Protolithe initial
	S10	24,57	13,29	0,32	3,59	146	23,1	30,8	19,9	
Gneiss à saphir-biotite-grenat	S9	31,73	15,15	1,36	6,45	386	48,7	117	42,7	Minéralisation à saphir
Biotite à saphir et grenat	S11	18,07	26,46	2,85	6,36	93,8	41,8	69,6	67	
Veinule tardive à grenat-biotite et quartz	S8	18,91	25,32	3,11	9,90	492	46,3	119	72	Veine tardive

Tableau 5 : Analyse de quelques éléments majeurs et mineurs obtenus respectivement par ICP - AES et ICP - MS de roches du gisement de Sahambano. Les échantillons analysés ne correspondent pas aux lames minces étudiées mais à des roches strictement identiques.

III-2-5 Le padparadscha

Cette variété de saphir a été décrite pour la première fois au Sri Lanka. Elle a ensuite été identifiée en Tanzanie (placer de la vallée d'Umba) et à Madagascar (placers). La couleur spécifique du saphir appelé padparadscha est le rose-orangé (Notari, 1997). Cette définition implique qu'il s'agit d'un pôle rose plus ou moins additionné de jaune-orangé. La couleur du padparadscha est due à la présence de Cr^{3+} du Cr_2O_3 en coordination octaédrique, et de Fe^{3+} du Fe_2O_3 dans le cadre d'un transfert de charge avec l'oxygène. La valeur économique de cette variété de saphir est très élevée (jusqu'à 10 000 \$/carats pour une pierre taillée). De ce fait, aujourd'hui de nombreux gisements utilisent cette appellation pour des pierres orangées ou pour d'autres catégories de gemmes qui ne correspondent pas à la définition Sri Lankaise des padparadschas.

Dans son étude sur les padparadschas, Notari (1997) soulève le flou régnant actuellement sur l'appellation de cette variété de gemme. Il propose que le padparadscha soit une variété chromatique (rose additionné d'orange) de saphir coloré et non géographique, même si la réglementation à ce sujet reste géographique (origine Sri Lankaise uniquement). Ses études montrent que les chromophores présents dans le padparadscha sont le fer et le chrome dans des proportions variant de 0,04 à 0,8 % poids en remplacement d'ions Al^{3+} dans le réseau cristallin. Les variations des autres éléments Ga_2O_3 et TiO_2 sont très variables pour ces différents gisements qui apparemment ne présentent pas de domaines géochimiques distincts (Notari, 1997). Cependant, les rapports $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ en fonction de $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ utilisés par Sutherland et al. (1998) pour distinguer les suites de corindon d'origine géologique différente, met en évidence qu'il existe un domaine géochimique propre aux saphirs rose-orangés (Annexe B-19). Ce domaine peut se définir par un rapport $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ compris entre $0,24 < \text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3 < 17,5$. Les données des saphirs rose-orangés et orangés de Sahambano, s'inscrivent dans ce domaine et notamment ils occupent une partie du domaine des padparadschas de Madagascar (Peretti et Gunther, 2002). Ce diagramme montre également que chaque type de saphir rose-orangé varie en fonction du rapport $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ (figure 33).

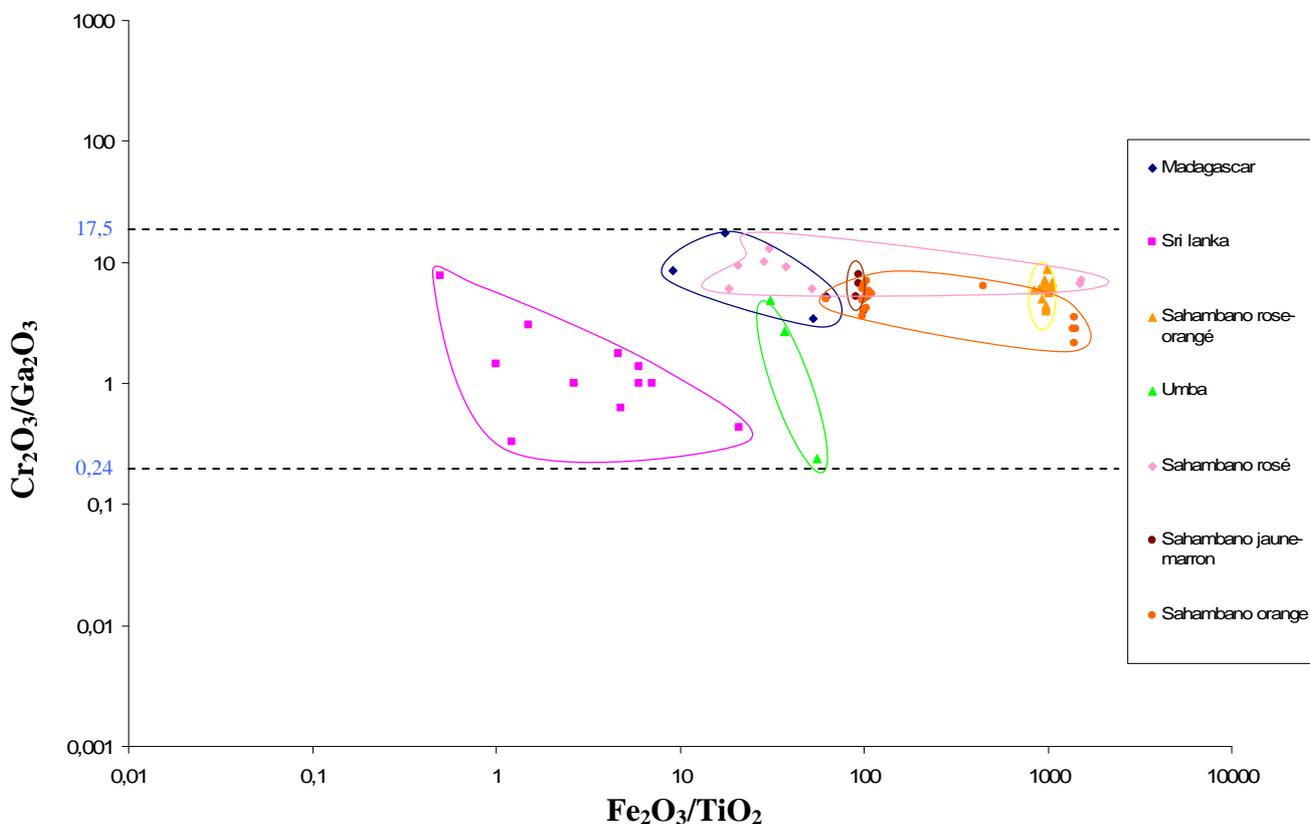


Figure 33 : Diagramme $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ - $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ de padparadscha de différentes origines et des saphirs rose orangés à oranges de Sahambano.

Une étude spectroscopique sur les saphirs rosés à orangés de Sahambano, a été réalisée au laboratoire Gübelin à Lucerne (Suisse). La comparaison des spectres (figure 34) réalisés sur deux saphirs orangé et rosé de Sahambano avec ceux établis par Schmetzer et Schwarz (2004) sur des padparadschas Sri Lankais (Annexe B-20), nous a permis de faire les remarques suivantes.

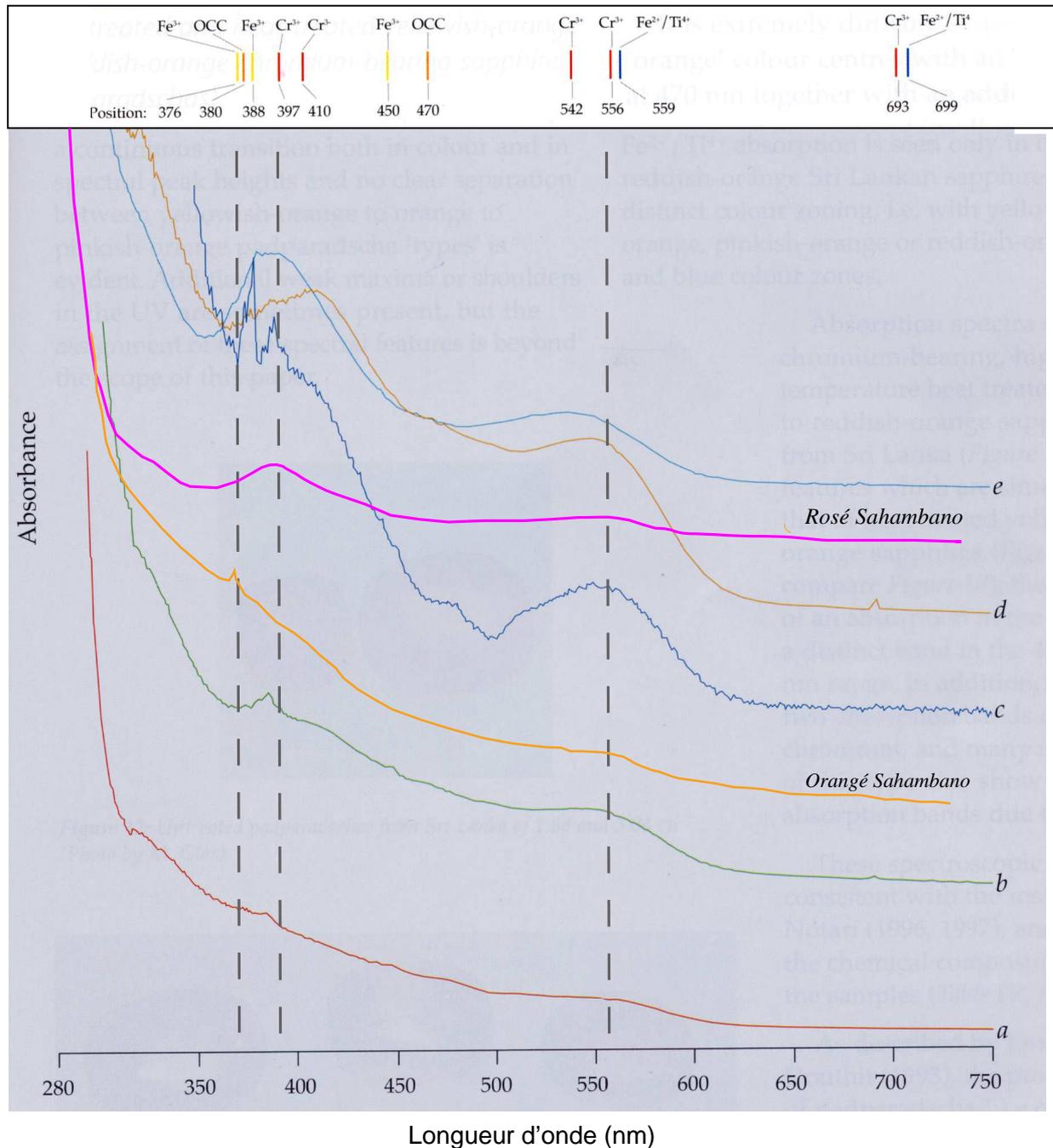


Figure 34 : Spectres infrarouges de 5 padparadschas Sri Lankais (a-e) et de 2 saphirs de Sahambano de couleur rosé et orangé (modifié de Schmetzer et Schwarz, 2004).

Les spectres infrarouges de padparadscha Sri Lankais (spectres **a** à **e**), se caractérisent par une augmentation continue de l'absorption des domaines du rouge (750 nm) au violet (350 nm). Avec une teneur en chrome croissante des échantillons **a** à **e**, les pics de Cr^{3+} s'individualisent plus nettement (556, 410 ou 397 nm). Cependant, pour les échantillons jaune-orangé (**c** et **e**), les bandes d'absorptions liées au Fe^{3+} (376 et 388 nm) prédominent sur celles du Cr^{3+} . Pour des saphirs de couleur jaune, ces mêmes bandes d'absorptions sont dues à la présence de défauts dans la structure cristalline appelés « centres colorés » (Schmetzer et Schwarz, 2004). Ces défauts peuvent se matérialiser par un manque ou un ajout supplémentaire d'ions. Or, l'absence de pic au niveau des bandes d'absorptions des centres colorés de couleur orange (OCC), indique que les OCC ne jouent aucun rôle dans la coloration des padparadschas jaune-orangé. Ils semblent donc que la couleur de ce type de padparadscha soit due en partie aux centres colorés jaunes.

Les spectres de saphirs de Sahambano présentent les mêmes caractéristiques d'absorption que les spectres de padparadscha rose-orangé Sri Lankais. Une augmentation de l'absorption du rouge au violet et une absorption plus marquée au niveau de Cr^{3+} et Fe^{3+} . En effet, les saphirs rosés présentent un épaulement vers 556 nm et une absorption bien marquée à 397 nm, caractéristiques des bandes d'absorptions du Cr^{3+} . Les saphirs orangés présentent eux, un épaulement vers 556 nm (Cr^{3+}) et un léger pic au niveau de 376 nm, caractéristique d'une des bandes d'absorptions du Fe^{3+} . Ces observations sont en accord avec le fait que lorsque l'on passe d'une couleur rosée à orange, le rapport $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Cr}_2\text{O}_3$ augmente (figure 31).

IV- DISCUSSION

Le gisement de Sahambano est situé dans des roches métamorphiques constituées de gneiss feldspathique et de leptynite. Les corindons se rencontrent dans des zones lenticulaires au sein des gneiss feldspathiques et sont généralement concentrés dans des lits de biotitites. Dans ces gneiss le quartz est absent ; il ne se retrouve que dans les leptynites situées dans la série métamorphique environnante. Les biotitites, généralement parallèles à la foliation, témoignent d'ouvertures ou de fractures dans les gneiss feldspathiques qui ont permis la circulation d'un fluide minéralisateur.

L'origine des gneiss feldspathiques ne fait pas l'objet de cette étude mais il est possible que la feldspathisation soit le résultat d'une métasomatose développée à l'échelle régionale, qui a eu pour effet la dissolution du quartz et le développement de feldspath potassique. Par contre, les biotitites et les gneiss biotitisés à grenat et saphir sont étroitement associés à une métasomatose alcaline de type biotitisation qui s'est développée sur les gneiss feldspathiques. Comme l'a montré l'étude pétrographique, le faciès à grenat, biotite et saphir s'est formé à partir d'un fluide métasomatique à une température d'environ $700 \pm 50^\circ\text{C}$ et une pression de 4 à 5 kbar. Les veines à biotite et grenat qui recoupent les gneiss feldspathiques, mais qui peuvent être parfois concordantes à la foliation métamorphique, témoignent d'une reprise plus tardive de l'activité de la circulation fluide à l'échelle du gisement. Le fait que les micas soient appauvris en aluminium (figure 16) et que le quartz soit présent dans ce type de veines tardives (figure 14), expliquerait en partie l'absence de corindon dans ce type de faciès.

Le corindon étant exclusivement composé d'aluminium et d'oxygène, nous pouvons nous poser la question de savoir quelle est l'origine de cet aluminium. Cette question peut être discutée à partir des analyses géochimiques réalisées sur les gneiss feldspathiques qui représentent le protolithe de départ des corindons (tableau 5). On peut alors constater que ces gneiss sont très riches en Al_2O_3 (environ 25% poids) et peuvent donc constituer une source suffisante en aluminium pour le corindon.

En comparant ces gneiss feldspathiques aux roches affectées par la biotitisation métasomatique (gneiss biotitisés à saphir-biotites et veines tardives à biotite et grenat), on s'aperçoit que l'aluminium varie peu d'un faciès à un autre. Il en est de même pour les éléments comme le fer, le titane, le gallium ou le magnésium. Nous avons aussi vu auparavant que les saphirs colorés de Sahambano étaient chromifères. Les analyses géochimiques révèlent que les gneiss feldspathiques, contiennent jusqu'à 146 ppm de chrome ce qui est une teneur suffisante pour expliquer la formation des différents saphirs colorés de Sahambano. Une première hypothèse pour la source des éléments constitutifs du saphir serait par conséquent de dire que le fluide métasomatique a mobilisé ces différents éléments contenus dans le protolithe lors de l'interaction fluide-gneiss feldspathique. Cette hypothèse peut être encore discutée sur la base des analyses géochimiques obtenues sur les faciès métasomatiques qui présentent des enrichissements notoires par rapport aux gneiss feldspathiques notamment en chrome ($93,8 < Cr_2O_3(\text{ppm}) < 492$), titane ($1,36 < TiO_2(\% \text{ poids}) < 3,11$), cobalt ($42,7 < Co(\text{ppm}) < 72$) et nickel ($69,6 < Ni(\text{ppm}) < 119$). Une deuxième hypothèse pourrait donc envisager le soutirage des éléments de l'encaissant gneissique par un fluide déjà riche en chrome, titane, cobalt et nickel.

Le cobalt et le nickel ne jouent aucun rôle dans la coloration des corindons ; cependant ils sont un excellent indicateur de source, notamment des roches mafiques et ultramafiques. Ainsi ce fluide enrichi en Cr, Co et Ni pourrait soit être d'origine profonde (source mantélique), soit d'origine crustale mais avec un enrichissement résultant de l'interaction avec des formations mafiques à ultramafiques au cours de sa remontée dans la zone de cisaillement. De tels mélanges de fluides d'origine crustale et mantélique ont déjà été mis en évidence par les études isotopiques menées par Pili (1997) sur ces grandes zones de cisaillements du Sud de Madagascar. Les deux hypothèses sont possibles. Mais seuls un bilan de masse géochimique sur les protolithes métasomatiques ainsi que des données isotopiques sur les différents minéraux, nous permettraient de trancher entre ces hypothèses.

La diversité des couleurs de corindons rencontrées sur le gisement est fonction de la variation de leur teneur en chrome, avec une teneur en fer quasiment constante. Nous avons vu que certains cristaux présentent deux stades de formation (figure 24), marqués par des différences de couleur caractérisant des passages fuschia, rose, marron ou orangé (stade 1) à des couleurs bleues (stade 2). Les premiers cristaux à cristalliser sont donc riches en chrome, contrairement aux corindons de la deuxième phase. Le fluide minéralisateur est probablement unique et de même origine. Cette hypothèse s'appuie sur le fait que les micas des gneiss feldspathiques biotitisés et des veines tardives (faciès métasomatiques issu de fluide de génération différentes), présentent un domaine chimique commun (figure 17). Par ailleurs, des analyses isotopiques de l'oxygène obtenues sur ces saphirs, confirment l'homogénéité du fluide en équilibre avec le corindon (Giuliani, communication personnelle). L'existence même de différentes couleurs de corindon dans une même zone métasomatique n'est donc pas le résultat de plusieurs fluides d'origine différente, ni celui d'un effet de composition chimique du protolithe qui est supposé homogène, mais de stades de cristallisation discontinus dans le temps. Le fluide a circulé plusieurs fois dans les mêmes structures par un système de pulsations successives. Pour chaque pulsation, la composition chimique du fluide a fluctué notamment sa teneur en chrome.

L'étude des saphirs de Sahambano présente également un intérêt géologique pour la classification des gisements de corindons primaires. La figure 35 représente le diagramme Fe_2O_3/TiO_2 en fonction de Cr_2O_3/Ga_2O_3 avec les domaines de composition chimique de corindons d'origines géologiques différentes. Les analyses de Sahambano représentées en bleu sur la figure, caractérisent un domaine compris globalement entre 10 et 1200 pour le rapport Fe_2O_3/TiO_2 , et entre 0,1 et 30 pour le rapport Cr_2O_3/Ga_2O_3 . Nous remarquons que le domaine géochimique défini par les gneiss biotitisés de Sahambano constitue un nouveau type de gisement primaire

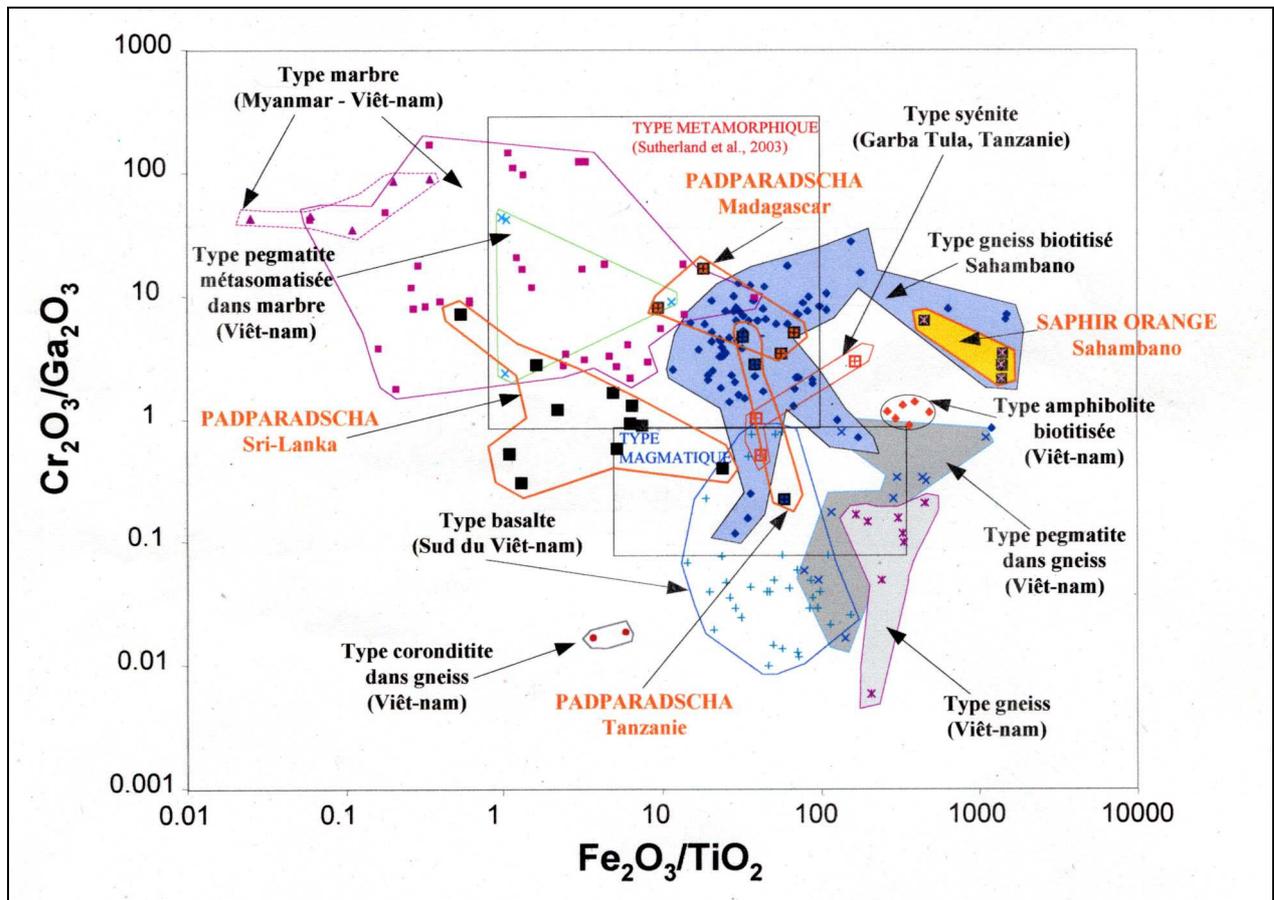


Figure 35 : Diagramme $Fe_2O_3/TiO_2-Cr_2O_3/Ga_2O_3$ de gisements primaires à corindon de différentes origines géologiques et de Sahambano (modifié de Garnier et al., 2004).

Ce domaine empiète à la fois sur les domaines métamorphiques et basaltiques proposés par Sutherland et al. (2003). Il ne recoupe ni les pegmatites métasomatisées, ni les gneiss du Viêt-Nam. Il recoupe le domaine attribué aux corindons syénitiques de Garba Tula (Tanzanie). Il apparaît donc que les domaines métamorphiques et magmatiques définis par Sutherland et al. (2003) sont applicables uniquement aux gisements de type basaltique australiens et thaïlandais. Sahambano définit ainsi un nouveau type de gisement : les gneiss biotitisés à corindons.

Concernant les padparadschas, nous avons vu que l'appellation gemmologique et commerciale, est exclusivement réservée aux saphirs rose-orangés Sri Lankais et que l'appellation padparadscha de Tanzanie ou de Madagascar est fortement controversée. Aujourd'hui, l'appellation padparadscha est donc problématique puisque deux saphirs de même couleur mais provenant de pays distinct doivent être appelés différemment. Schmetzer et Schwarz (2004) proposent d'utiliser la terminologie padparadscha pour des saphirs présentant un spectre d'absorption caractérisé par les bandes d'absorption du Fe^{3+} , du Cr^{3+} , avec parfois la présence de centres colorés jaunes ou orangés. Les saphirs rosés et orangés de Sahambano présentent la plupart de ces caractéristiques spectroscopiques. Par ailleurs, notre étude géochimique, a démontré que tous les saphirs rose-orangés à orangés ainsi que ceux de Sahambano, étaient caractérisés par un rapport Cr_2O_3/Ga_2O_3 compris entre 0,24 et 17,5 (figure 33). Cet intervalle géochimique pourrait constituer le nouveau paramètre géochimique pour la définition chimique du saphir dit « padparadscha ». Les saphirs rose-orangés de Sahambano qui répondent en grande partie à ces différents critères, pourraient être ainsi appelés saphirs de type padparadscha de Sahambano. Toutefois, l'opacité et la fracturation de ces cristaux, pose le problème de leur valorisation commerciale, sachant que le critère principal d'une gemme est sa transparence.

CONCLUSION

Les corindons du gisement de Sahambano ont une origine métasomatique. Les gneiss ont été biotitisés à la suite de circulation de fluides alcalins dans des structures tectoniques reliées à la zone de cisaillement majeure de Ranotsara. La paragenèse associée aux corindons de Sahambano est à spinelle, feldspath potassique, grenat, biotite et sillimanite. Elle est le résultat d'une percolation métasomatique des gneiss à environ 700–750°C et 4-5 kbars. La présence de musgravite dans les cipolins du gisement (minéral rare contenant du béryllium), témoigne de ces conditions métasomatiques de haute température et de basse pression.

La grande particularité de ce gisement réside dans la diversité des couleurs des corindons. Le taux de substitutions en éléments traces dans les corindons est environ de 0,4% dont une grande majorité des éléments est occupé par le fer et le chrome. La diversité des couleurs observées à Sahambano dépend directement du rapport de ces deux éléments. Le chrome peut provenir du protolithe tout comme du fluide. L'encaissant gneissique, riche en alumine, a probablement fourni l'aluminium nécessaire à la cristallisation de ces corindons. La forte concentration en cobalt et nickel des faciès métasomatiques indiquent une interaction du fluide avec des roches mafiques et ultramafiques avant de parvenir dans les gneiss.

Les saphirs rose-orangés de Sahambano suscitent un intérêt économique important. L'appellation padparadscha de ces cristaux, permettrait une valorisation des saphirs de la mine nettement plus élevée. Les critères permettant de distinguer les padparadschas restent encore aujourd'hui purement géographique puisque cette appellation est exclusivement réservée aux saphirs rose-orangés Sri Lankais. Le fait de ne pas pouvoir appeler deux saphirs rose-orangés sous le même nom, a donc suscité l'intérêt de réaliser des études gemmologiques et certains critères (notamment spectroscopiques) sont déjà établis. Notre étude montre que les saphirs rose-orangés de type padparadscha se situent dans un domaine géochimique de rapport $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Ga}_2\text{O}_3$ compris entre 0,17 et 24. Cet intervalle de valeur pourrait servir de critère chimique pour l'appellation « padparadscha ». La présence de saphirs de toutes les couleurs sur quelques centaines de m², de minéral rare comme la musgravite, de cristaux automorphes de corindons polychromes et probablement de saphirs rose-orangés de type padparadscha, constituent entre autre le caractère exceptionnel du gisement de Sahambano. Cependant, l'opacité et l'état de fracturation des cristaux restent un problème économique que seule l'utilisation d'un traitement thermique pourrait corriger.

Ce type de gisement à corindon a déjà été décrit en Inde, mais il ne l'a jamais été à Madagascar. D'autres gisements de type métasomatique doivent cependant exister à Madagascar car beaucoup de régions restent encore aujourd'hui inexplorées et les zones de cisaillements où sont signalées des circulations fluides sont nombreuses. Le gisement de Zazafotsy, situé à 50 km au nord de Sahambano, en est sûrement un exemple car les corindons sont contenus dans des biotites résultant de l'altération métasomatique de gneiss feldspathiques. Des études isotopiques sur les micas permettraient de déterminer l'origine du fluide minéralisateur de ces deux gisements : crustale, mantélique ou de mélange. Les zircons trouvés en inclusion dans les corindons pourraient de plus, permettre de dater la formation des corindons et donc l'épisode de circulation de ces fluides. Au sens large, l'ensemble de ces études permettrait une meilleure compréhension d'une partie de l'histoire géologique complexe de Madagascar, à savoir la circulation des fluides associées aux zones en extension lors de sa collision avec l'Afrique il y a environ 550 Ma.

Références bibliographiques

- DEVOUARD B., RAITH M., RAKOTONDRAZAFY R., EL-GHOZZI M., et NICOLLET C. (2002) Occurrence of musgravite in anorthite-corundum-spinel-sapphirine rocks (“sakenites”) from South Madagascar: evidence for a high-grade metasomatic event. *18th general meeting of the IMA*, Edinburgh, Scotland.
- GARNIER V., OHNENSTETTER D., GIULIANI G., SCHWARZ D. (2004) Les gisements de corindon: classification et genèse. *Le Règne Minéral*, **55**, 7-47.
- HOLLAND T. et POWELL R. (1998) An internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology*, **16**, 309.
- KIEFERT L. et SCHMETZER K. (1998) Distinction of Taaffeite and musgravite. *J.Gemm.*, **26**, 165-167.
- NICOLLET C. (1986) Sapphirine et staurotide riche en magnésium et chrome dans les amphibolites et anorthosites à corindon du Vohibory Sud, Madagascar. *Bull. Minéral.*, **109**, 599-612.
- NICOLLET C. (1990) Crustal evolution of the granulites of Madagascar. In *Granulites and Crustal Differentiation* (eds. Vielzeuf D. and Vidal P.). Kluwer Academic publishers, 291-310.
- NOTARI F. (1997) Le saphir padparadscha. *Revue de gemmologie AFG*, **132**, 24-27.
- PERETTI A., GUNTHER D. (2002) The color Enhancement of fancy sapphires with a new heat-treatment technique (part A): inducing color zoning by internal migration and formation of color center. GRS. Contribution to gemology, No1.
- PILI E. (1997) Distribution et transfert des fluides à l'échelle de la lithosphère continentale. Thèse, université de Lyon I.
- POUCHOU J.L. et PICHOIR F. (1991) Quantitative analysis of homogeneous or stratified micro-volumes applying the model “PAP”. In: *Electron probe quantitation* (eds. Heinrich K.F.J. and Newbury D.E.). Plenum Press, New York, 31-75.
- RAKOTONDRAZAFY M.A.F (1995) La Hibonite du S.E. de Madagascar- caractère et modalités de formation dans les skarns à thorianite du faciès granulite. Thèse, université d'Antananarivo.
- SANTOSH M. et COLLINS A.S. (2003) Gemstone mineralization in the Palghat-Cauvery Shear zone system (Karur-Kangayam belt), Southern India. *Gondwana Research*, **6**, No.4, 911-918.
- SCHMETZER K. et SCHWARZ D. (2004) The causes of colour in untreated, heat treated and diffusion treated orange and pinkish-orange sapphires – a review. *J.Gemm.*, **29**, 149-182.
- SUTHERLAND F.L., SCHWARZ D., JOBBINS E.A., COENRAADS R.R. et WEBB G. (1998) Distinctive gem corundum suites from discrete basalt field: a comparative study of Barrington, Australia and West Pailin, Cambodia, gemfields. *J.Gemm.*, **26**, 65-85.
- SUTHERLAND F.L., COENRAADS R.R., SCHWARZ D., RAYNOR L.R., BARRON B.J. et WEBB G.B., (2003) Al-rich in alluvial ruby and corundum-bearing xenoliths, Australian and SE Asian basalt fields. *Mineralogical Magazine*, **67**, 717-732.

TABLE DES MATIERES

	P.
Résumé/Abstract	1
I - INTRODUCTION	2
II - MATERIEL ET METHODES	
II-1 : Le microscope optique	4
II-2 : Le Microscope Electronique à Balayage (MEB)	4
II-3 : La microsonde électronique	4
II-4 : La spectroscopie Raman	5
II-5 : La spectroscopie infrarouge	5
II-6 : Les analyses géochimiques de roches	5
III - RESULTATS	
III-1 : Etude pétrographique	
III-1-1 : Etude macroscopique	6
III-1-2 : Etude microscopique	
III-1-2-1 : Gneiss feldspathique à corindon (MOII-9)	7
III-1-2-2 : Gneiss feldspathique à biotite et corindon (127-4)	8
III-1-2-3 : Gneiss biotitisés (S3/S2)	9
III-1-2-4 : Biotitite à minéraux (SA2/ S15)	10
III-1-2-5 : Marbre à minéraux : cipolin (127-9)	11
III-1-2-6 : Veine à biotite et grenat (S1/125-17)	12
III-1-3 : Analyse chimique des minéraux	
III-1-3-1 : Les micas	13
III-1-3-2 : Les feldspaths	14
III-1-3-3 : Les grenats	15
III-1-3-4 : Les spinelles	15
III-1-3-5 : La musgravite	16
III-1-4 : Le géothermomètre à grenat-biotite	17
III-2 Etude minéralogique des corindons	
III-2-1 : Description macroscopique	18
III-2-2 : Description microscopique (étude MEB)	19
III-2-3 : Géochimie des corindons	
III-2-3-1 : L'origine de la couleur dans les corindons	20
III-2-3-2 : La géochimie des éléments traces des corindons	20
III-2-4 : Origine des éléments chromophores dans les saphirs	23
III-2-5 : Le padparadscha	24
IV - DISCUSSION	26
CONCLUSION	29
Références bibliographiques	30

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte topographique de Sahambano (1/200.000^{ème}). Les numéros sont les secteurs de prélèvement d'échantillons. On peut observer la chaîne du Manivala qui constitue la bordure Est de la faille de Ranotsara et les grandes structures de déformation associées, orientées NNW/SSE.

Figure 2 : Inclusion de sillimanite dans le grenat et le FK (Photo en lumière polarisée, LPA).

Figure 3 : Texture coronitique composée de saphirine et d'un silicate d'alumine développé entre le spinelle et le FK (photo MEB).

Figure 4 : Cristaux de corindon squelettique, de biotite et de FK (photo LPA).

Figure 5 : Monocristal de corindon et de grenat dans une matrice feldspathique (photo LPA).

Figure 6 : Réaction coronitique de la sillimanite entre le spinelle et le feldspath (photo LPA).

Figure 7 : Transformation partielle du spinelle en corindon (photo en lumière naturelle, LN).

Figure 8 : Inclusion de spinelle dans du corindon (photo LN).

Figure 9 : Réaction entre le FK et le corindon avec apparition de spinelle et de micas (photo LN).

Figure 10 : Inclusion de sillimanite et de biotite dans du grenat (photo LPA).

Figure 11 : Cristallisation de biotite à partir du FK (photo LN).

Figure 12 : Réaction coronitique entre la forstérite et la calcite (photo MEB).

Figure 13 : Réaction coronitique entre la calcite et le spinelle (photo MEB).

Figure 14 : Cristaux de grenat, biotite et de quartz dans la lame 125-17(photo LPA).

Figure 15 : Cristaux de corindons, spinelle, biotite et FK dans la lame S1 (photo LN).

Figure 16 : Diagramme Al VI-XMg pour les micas.

Figure 17 : Diagramme Al VI-Ti pour les micas.

Figure 18: Diagramme Albite, Anorthite, Orthose des feldspaths.

Figure 19 : Diagramme Pyrope, Almandin, Andradite des grenats.

Figure 20 : Diagramme Spinelle, Hercynite, Gahnite des spinelles.

Figure 21 : Spectre Raman de la musgravite de Sahambano.

Figure 22 : Diagramme Pression-température, établi à partir du géothermomètre Grenat-Biotite d'après la méthode de Holland et Powell (1998).

Figure 23 : Cristaux de corindon de Sahambano d'habitus, de taille et de couleur différents. Largeur des photos : 2cm.

Figure 24 : Corindons polychromes : A- prisme hexagonal présentant une croissance en deux stades avec une zone de contact brutal ; B- 3 prismes hexagonaux avec un changement de couleur progressif; C- prisme hexagonal aplati présentant une zonation de couleur suivant le pinacoïde.

Figure 25 : Inclusions de FK, plagioclase et sillimanite en bordure d'un corindon (photo MEB).

Figure 26 : Inclusions de spinelle, micas, quartz et cordiérite au cœur d'un corindon (photo MEB).

Figure 27 : Inclusion de sillimanite, FK et micas au cœur d'un corindon (photo MEB).

Figure 28 : Inclusion de barytine et de pyrite dans un corindon (photo MEB).

Figure 29 : Inclusion de zircon dans le corindon. Ce zircon présente deux phases de croissance (photo MEB).

Figure 30 : Fractures secondaires remplies de diaspore recoupant le corindon (photo MEB).

Figure 31 : Diagramme Cr_2O_3 - $Fe_2O_3+MgO+Ga_2O_3$ (en ppm) des différentes couleurs de corindon.

Figure 32 : Diagramme $TiO_2-Fe_2O_3$ (en ppm) de différentes couleurs de corindon.

Figure 33 : Diagramme Fe_2O_3/TiO_2 - Cr_2O_3/Ga_2O_3 de padparadscha de différentes origines et des saphirs rose orangés à oranges de Sahambano.

Figure 34 : Spectres infrarouges de 5 padparadschas Sri Lankais (a-e) et de 2 saphirs de Sahambano de couleur rosé et orange (modifié de Schmetzer et Schwarz, 2004).

Figure 35 : Diagramme Fe_2O_3/TiO_2 - Cr_2O_3/Ga_2O_3 de gisements primaires à corindon de différentes origines géologiques et de Sahambano (modifié de Garnier et al., 2004).

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Seuil de détection des éléments pour les corindons à la microsonde électronique.

Tableau 2 : Présentation macroscopique des échantillons étudiés.

Tableau 3 : Analyse microsonde électronique d'une musgravite du cipolin de Sahambano.

Tableau 4 : Inclusions solides observées au MEB dans des corindons de différentes couleurs.

Tableau 5 : Analyse de quelques éléments majeurs et mineurs obtenus respectivement par ICP - AES et ICP - MS de roches du gisement de Sahambano. Les échantillons analysés ne correspondent pas aux lames minces étudiées mais à des roches strictement identiques.