

Dossier « Madagascar, le paradis des gemmes et des minéraux ».

SYNTHESE DE L'ETUDE

.Page 10 :

Le gisement de saphirs de Sahambano se situe bien sur le territoire minier de SA Mines Tany Hafa (Permis E 1620)

.Pages 12/13 :

Analyses au MEB : la section polie du saphir est bombardée par un faisceau d'électrons pour obtenir la chimie exacte de la pierre.

Les résultats font apparaître que les échantillons prélevés dans les gisements du Permis E1620 sont bien des saphirs et rubis purs, très proches de la valeur théorique scientifique du saphir et du rubis.

.Page 15 :

Analyse des inclusions des rubis et saphirs. On trouve des inclusions de zircon qui contiennent du Thorium (minéral stratégique à très haute valeur puisque le Thorium est la meilleure qualité de l'Uranium).

.Page 22 :

Les principaux gisements de gemmes à Madagascar se situent dans les pegmatites qui ont une énorme importance économique.

Or Tany Hafa a un champ de pegmatites qui longe la faille de Ranotsara sur 100 Km environ.

INTRODUCTION

MEB
af

Madagascar est une île située à l'est de l'Afrique, dans l'hémisphère austral. L'événement principal de l'histoire géologique de Madagascar est l'orogénèse panafricaine (fin du protérozoïque), aboutissant à la formation du supercontinent Gondwana. C'est en effet durant cette phase que la minéralisation de l'île a eu lieu, grâce, entre autres, à des processus métamorphiques et à des circulations hydrothermales. Madagascar est ainsi devenue *le paradis des minéraux et des gemmes*. La notion de gemme est avant tout une notion économique. En effet, ce sont des minéraux ou assemblage de minéraux dont la beauté et la rareté en font des objets de bijouterie.

Avant 1922 et la venue du géologue français A. Lacroix, Madagascar et sa géologie n'avaient jamais été étudiés. Ce dernier, dans sa Minéralogie de Madagascar développe toute la minéralogie de l'île en décrivant les types de gisements et les minéraux présents. Il faut attendre 1966 et la venue de H. Besairie pour que les écrits de A. Lacroix soient réactualisés dans Gîtes minéraux de Madagascar. Par la suite, de nombreux articles sont parus dans diverses revues (Gems & Gemology, Fossiles et minéraux, Pour la science, etc...) à la suite de découvertes de nouvelles espèces minérales (Emeraude, Londonite, etc...). Enfin, Pezzotta, en 2001, publie un ouvrage, Madagascar : a mineral and gemstone paradise, répertoriant les minéraux et gemmes présents à Madagascar et quelques gisements.

Notre travail a donc été de réaliser une synthèse de tous ces documents sur les espèces minérales de Madagascar en listant les gemmes ainsi que leurs lieux de gisement. Nous avons réalisé ce travail sous forme d'un CDrom pour qu'il soit facilement utilisable et diffusable.

En parallèle de cette étude bibliographique, nous avons suivi des études expérimentales menées sur des rubis. Nous avons en particulier cherché à caractériser les inclusions solides de rubis de Madagascar, par MEB, et des inclusions fluides de rubis de Mogok (Birmanie), par microsonde RAMAN.

Notre travail s'articulera donc autour de deux axes : le premier traitant du travail bibliographique et la réalisation du CDrom et le deuxième, des expériences et des interprétations sur les rubis.

1. REALISATION D'UNE SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE SOUS LA FORME D'UN CDROM

1.1. La problématique et les moyens mis à notre disposition

Aucun document existant ne fait une synthèse complète sur les gemmes de Madagascar. En effet, les anciens documents tels que les ouvrages de H. Besairie (1966) et de A. Lacroix (1922) sont incomplets car ils ne tiennent pas compte des gisements ou des nouvelles espèces minérales gemmes récemment découverts. Les documents plus récents tels que l'ouvrage de Pezzotta (2001) ne répertorie pas tous les types de gisements existants à Madagascar. Enfin, des revues spécialisées dans la minéralogie traitent la plupart du temps d'un gemme en particulier.

Nous avons donc essayé de réaliser une synthèse regroupant, selon la classification qui nous semble être la plus logique possible, les nombreuses gemmes de Madagascar et leurs caractéristiques (minéralogie, type de gisement, localisation, etc...).

Les moyens mis à notre disposition sont une volumineuse bibliographie de laquelle nous avons dû dégager ces informations.

1.2. Démarche intellectuelle : mode de classement des gemmes de Madagascar

1.2.1. Liste des gemmes rencontrées à Madagascar

Nous avons tout d'abord voulu répertorier toutes les gemmes présentes à Madagascar. Nous nous sommes confrontés à un problème de niveau de classification. En effet, nous pensions dans un premier temps regrouper les gemmes par grande famille de structures minérales (tectosilicates, néosilicates, cyclosilicates,...) mais cela s'est vite révélé peu pertinent.

Nous avons finalement opté pour regrouper chaque gemme dans une famille plus grande de minéraux, lorsque cela était possible (par exemple, nous avons regroupé les rubis et les saphirs dans la famille des corindons), en précisant pour chacune, sa valeur économique en joaillerie.

1.2.2. Rappel sur les types de gisements existants

On peut classer les gisements minéraux selon la nature de la roche hôte.

Ceci peut se résumer par le diagramme suivant :

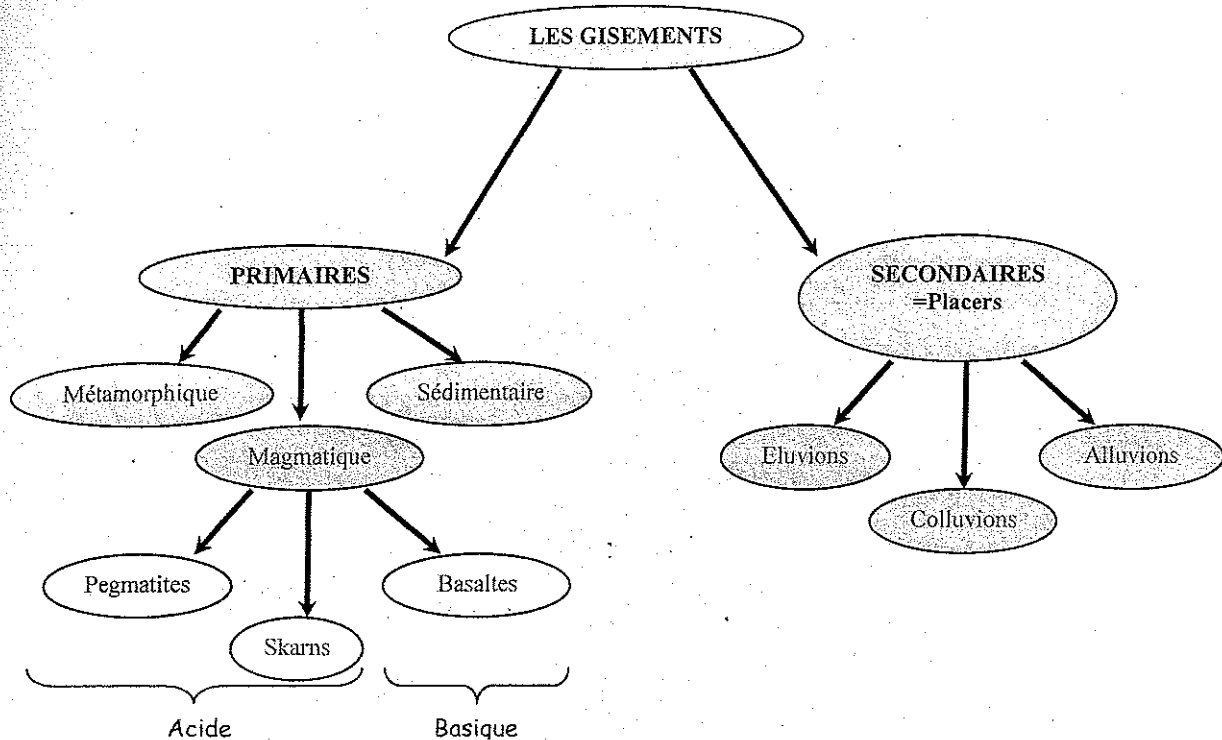


Figure 2 : Diagramme synthétique des différents types de gisements

Remarque : pour plus d'informations sur la géologie des gisements, se référer au CDrom.

1.2.3. Etude détaillée de chaque gemme

Pour chaque gemme, nous avons détaillé quelques points précis de sa minéralogie (formule, système, origine des couleurs) ainsi que les gisements dans lesquels on peut la trouver (type de gisement, localisation précise et mode de formation).

En effet, nous comptons par la suite faire une synthèse de la minéralogie de Madagascar sous forme de cartes par type de gisement.

voici l'exemple de la carte des pegmatites :

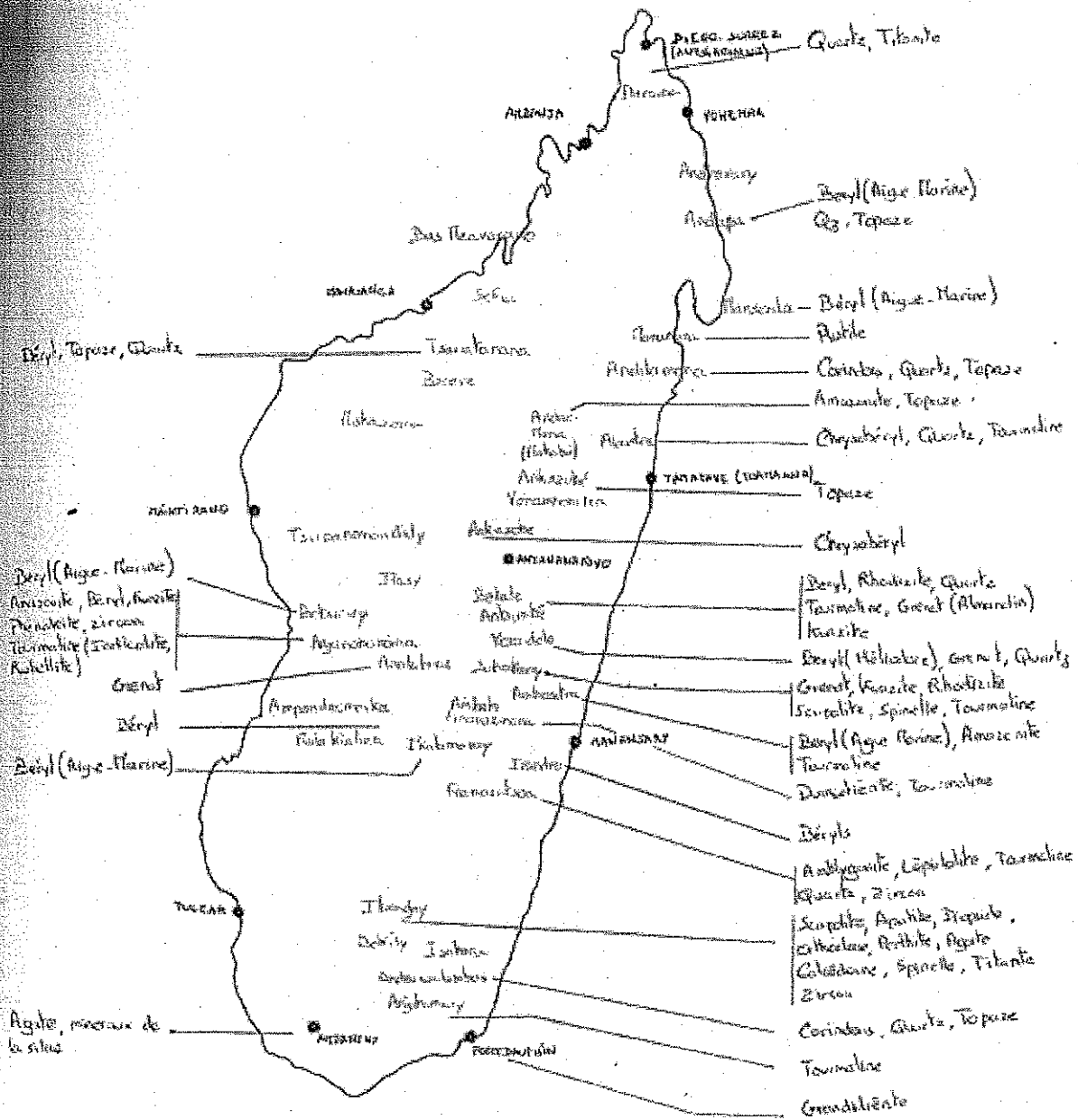


Figure 4 : Carte synthétique des gisements pegmatitiques

1.3. Le CDrom et son utilisation

Le plan du CDrom suit notre démarche intellectuelle :

Après une présentation de la géographie et de la géologie de Madagascar, nous avons répertorié les minéraux puis les gemmes de l'île sous forme de tableau. Nous avons ensuite donné les définitions des types de gisements en s'attachant à développer leurs spécificités malgaches. En outre, nous avons détaillé, pour chaque minéral, sa minéralogie et ses gisements. Enfin, nous avons réalisé les 6 cartes synthétiques par type de gisement.

Ce qui, au total, nous amène à 70 diapositives...

2. ANALYSE MINÉRALOGIQUE DES CORINDONS GEMMES

L'origine des corindons gemmes (rubis et saphirs) trouvés dans des placers et autres gisements secondaires est souvent difficile à déterminer. L'analyse des inclusions fluides et solides permet parfois de lever l'indétermination. Les outils généralement utilisés font appel à la spectroscopie (MEB et Raman) et à l'imagerie électronique.

2.1. Caractérisation d'inclusions solides par le MEB

2.1.1. Origine des échantillons analysés

Les corindons gemmes analysés proviennent de deux gisements de Madagascar :

- le gisement de Sahambano : il s'agit de saphirs violacés à roses, issus d'un gisement métamorphique de gneiss à plagioclases.
- le gisement de Vatomandry (à l'Ouest du canton de Tsivangaina) : il s'agit d'un placer de la côte Est de l'île. Les alluvions renferment des corindons gris rougeâtres ou brunâtres corrodés qui ont été exploités autrefois.

L'étude des inclusions solides va permettre de connaître l'origine de ces corindons.

2.1.2. Principe de fonctionnement du MEB et réglages effectués

La section polie est bombardée par un faisceau d'électrons. Ce bombardement engendre des interactions entre les électrons et la matière qui permettent d'obtenir des informations sur la chimie de la cible et des images de l'échantillon. Les interactions électrons/matière provoquent la production d'électrons secondaires (électrons de faible énergie, information globale sur la morphologie et l'état de surface de la cible) d'électrons rétrodiffusés (électrons de forte énergie issus de la diffusion élastique, renseignements sur le chimisme de la cible : la probabilité de rétrodiffusion augmente avec le numéro atomique moyen de la cible) et de photons X (photons de forte énergie caractéristiques de l'atome cible, information précise sur le chimisme de la cible).

Le MEB a pour principal objectif la réalisation d'images. L'imagerie électronique peut se faire par la mesure soit des électrons rétrodiffusés, soit par celle des électrons secondaires. Le balayage par électrons secondaires (SE) nous renseigne sur la topographie de la section et sa morphologie. La quantité d'électrons rétrodiffusés est proportionnelle au Z (numéro atomique) des atomes « excités ». Ainsi plus le Z d'un minéral est élevé, plus il y aura d'électrons rétrodiffusés et donc plus le minéral apparaîtra lumineux (blanc).

Le MEB utilisé pour ces expériences est le modèle Hitachi S2500. Il est composé d'un système de détection des électrons secondaires Everhart-Thornley (1 photomultiplicateur et 2 scintillateurs), d'un système de détection des électrons rétrodiffusés par 4 diodes, et d'un système de détection par spectrométrie à sélection d'énergie EDS (energy dispersive spectrometry) des rayons X par une diode Si-Li. Voici les photographies des installations que nous avons utilisées :

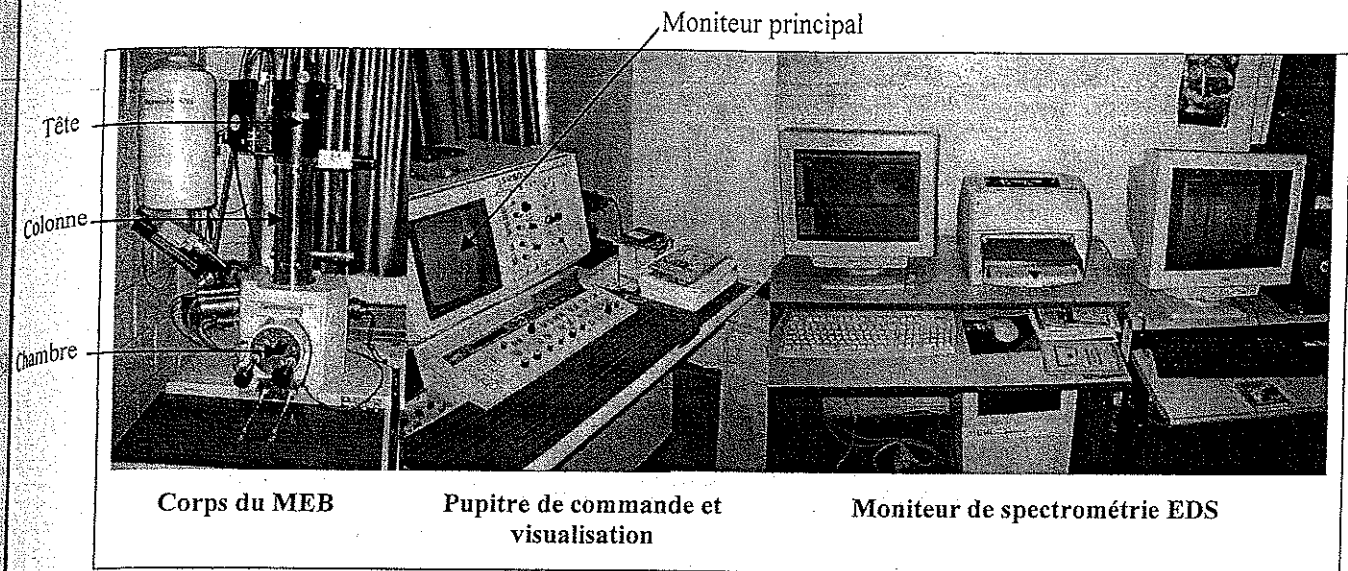


Figure 6 : photographies des installations MEB utilisées

La préparation des échantillons se fait en trois temps :

1. le montage : les échantillons en grains sont fixés sur un support adéquat (lamelle de verre ou support métallique) par du vernis à ongle
2. la métallisation : il s'agit du dépôt d'un mince film conducteur destiné à évacuer les charges provoquées sous le bombardement électronique (la roche est en effet un mauvais conducteur). La métallisation a eut lieu par vaporisation de carbone par passage d'un courant électrique puis condensation à la surface des échantillons.
3. le positionnement : c'est-à-dire l'insertion dans la chambre du MEB

Le vernis utilisé est un vernis à ongle vendu dans le commerce. Le vernis possède son propre spectre qu'il faut prendre en compte pour l'interprétation des spectres. Nous avons donc réalisé son analyse, son spectre est le suivant :

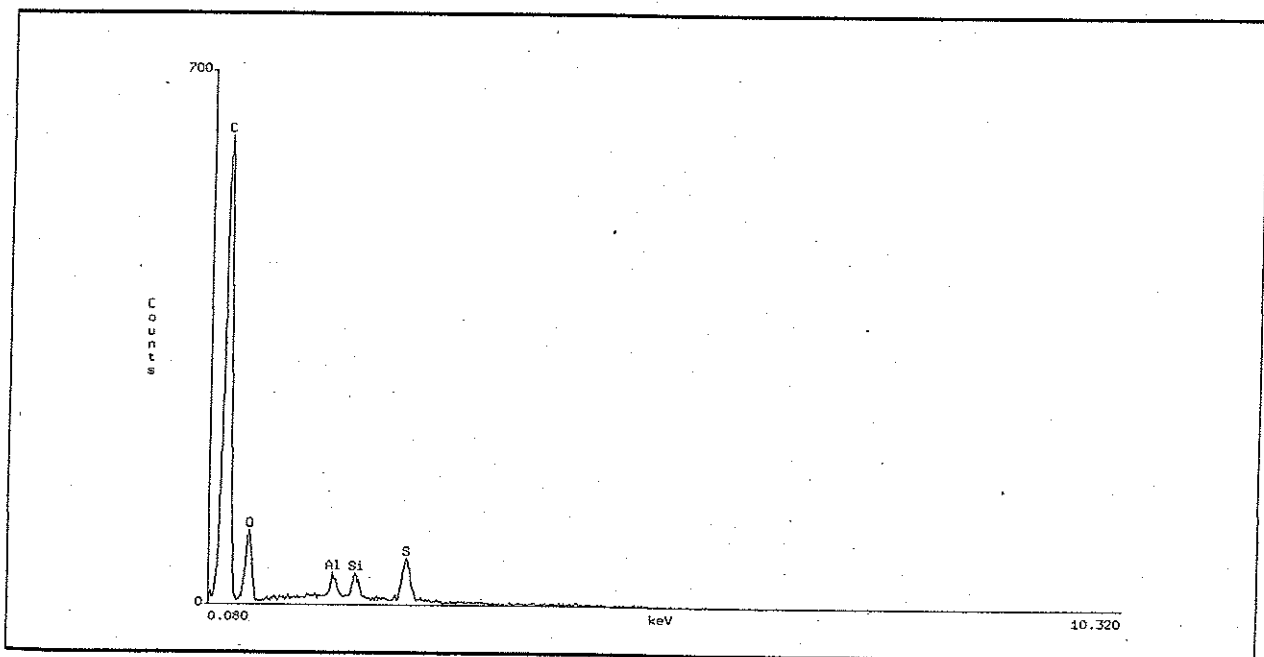


Figure 7 : spectre EDS du vernis utilisé (10 kvolt)

2.1.3. Résultats

2.1.3.1. Etude des saphirs du gisement de Sahambano

L'étude s'est portée sur deux grains de saphir inclus dans de la résine.

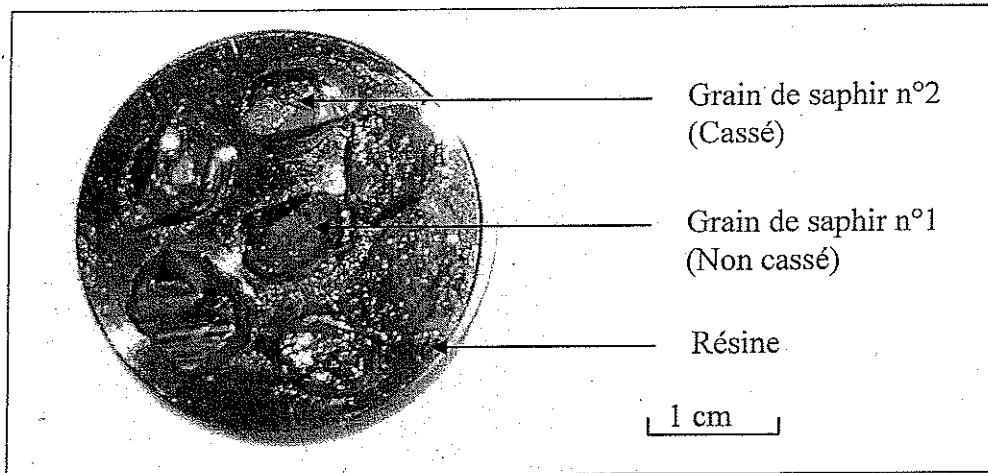


Figure 8 : inclusions de grains de saphirs en résine

Grain de saphir n°1 : On note en premier lieu que le minéral à étudier doit présenter une face horizontale et plane pour effectuer des mesures valables de spectrométries EDS. En effet, si ce n'est pas le cas, les proportions des éléments lors de l'analyse semi quantitative sont fausses.

Le spectre suivant présente la réponse du corindon pur.

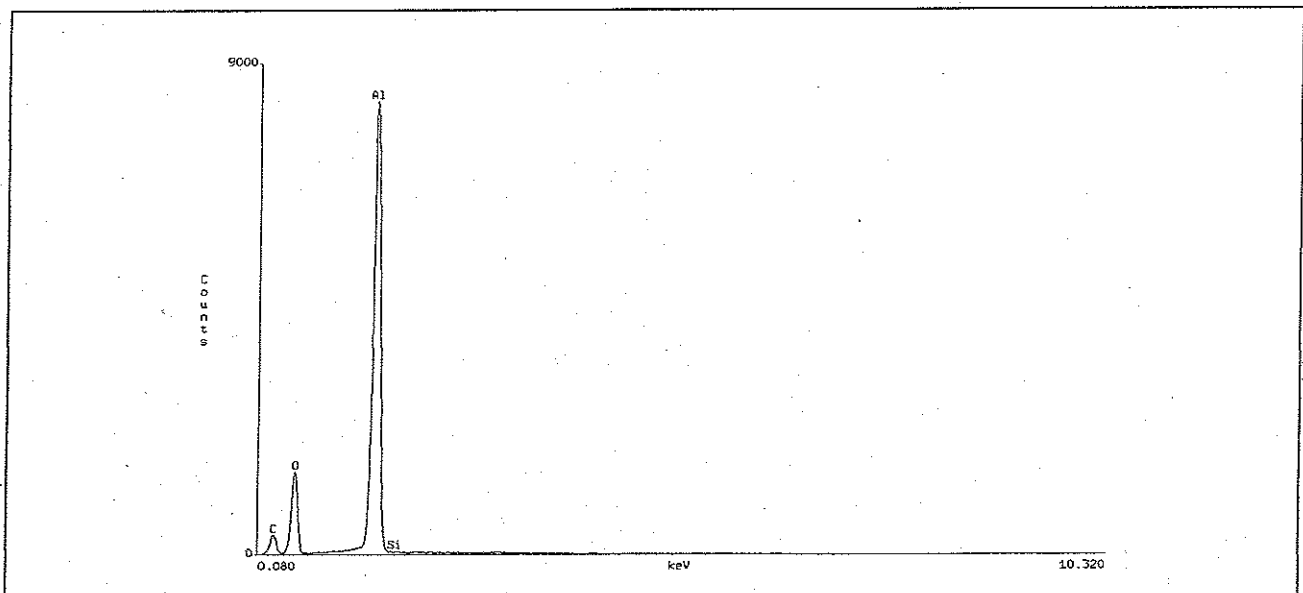


Figure 9 : spectre EDS du corindon pur (20 kvolt)

Le spectre donne des pourcentages massiques en éléments de 46.89% pour l'oxygène et de 53.11% pour l'aluminium. Les proportions théoriques données par la formule du corindon (Al_2O_3) donnent en pourcentages massiques des valeurs de 47% pour l'oxygène et

de 53% pour l'aluminium ; les valeurs mesurées sont donc très proches de la valeur théorique et le minéral analysé est bien du corindon pur.

Nous procédons maintenant à l'analyse des inclusions solides présentes dans le grain de saphir.

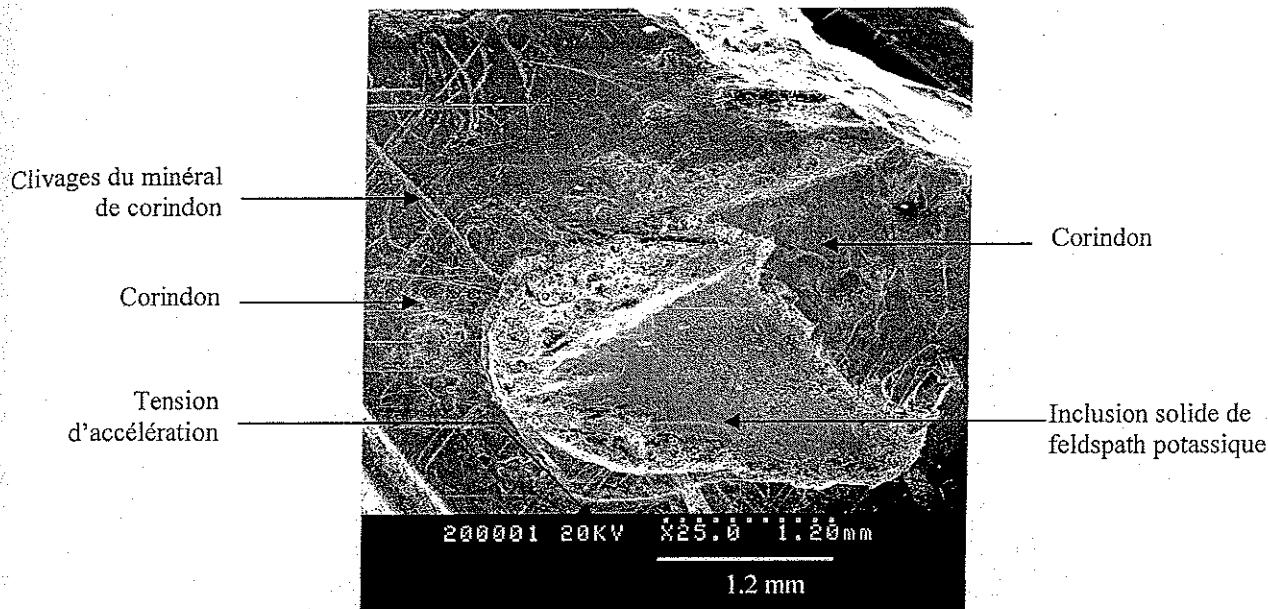
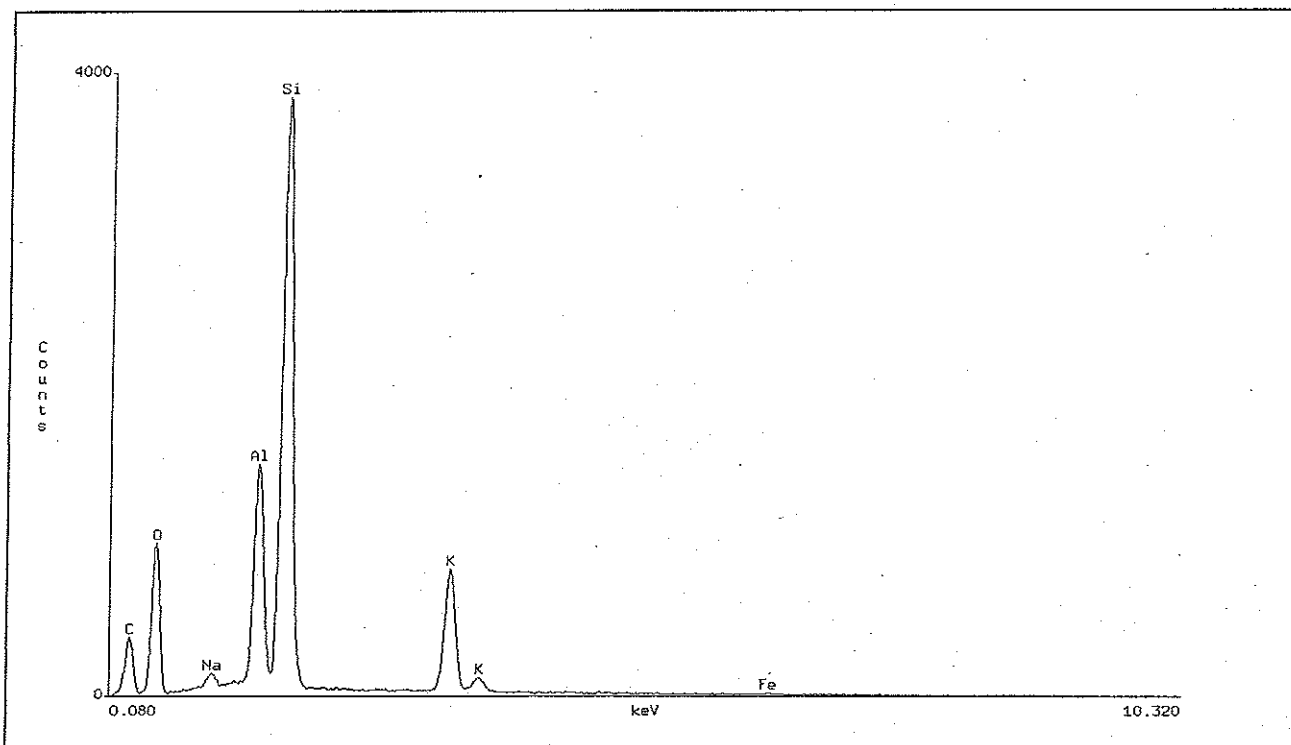


Figure 10 : photographie d'une inclusion de feldspath potassique dans le corindon en électrons secondaires



sodium	aluminium	silicium	potassium	fer	oxygene
1.23%	10.77%	30.92%	9.48%	0.3%	47.3%

Figure 11 : spectre EDS d'une inclusion à feldspath potassique (20 kvolt)

Grain de saphir n°2 : c'est un grain à cassure fraîche que nous allons étudier.
L'inclusion observée est la suivante :

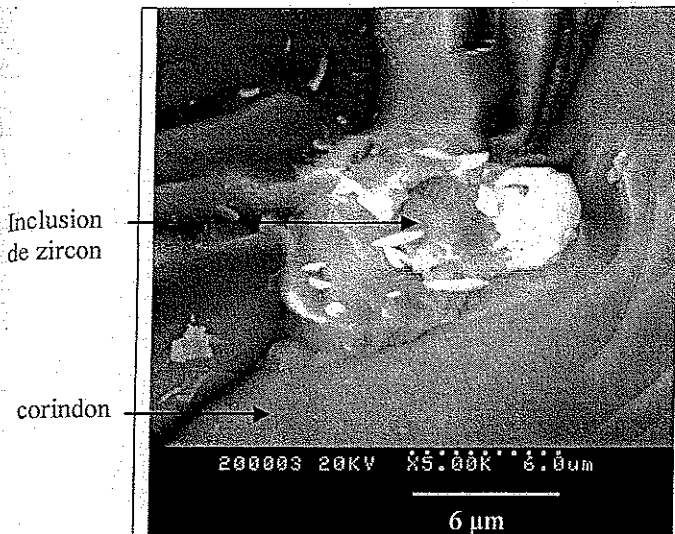


Figure 12 : photo en électrons secondaires de l'inclusion

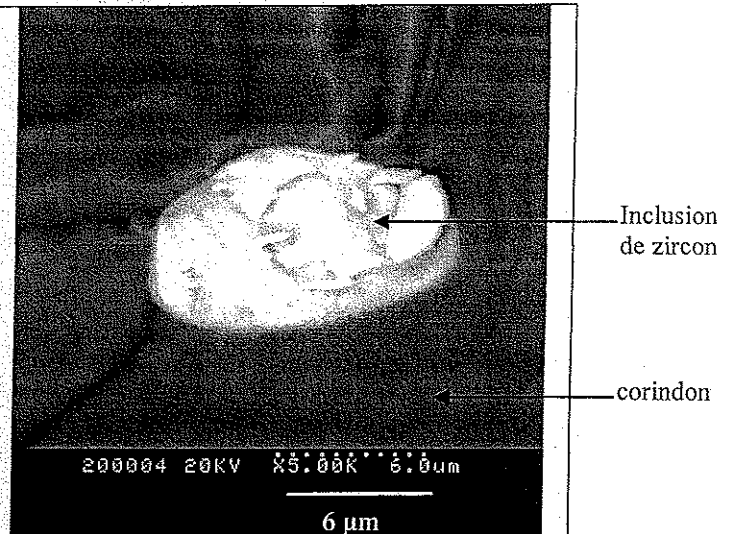
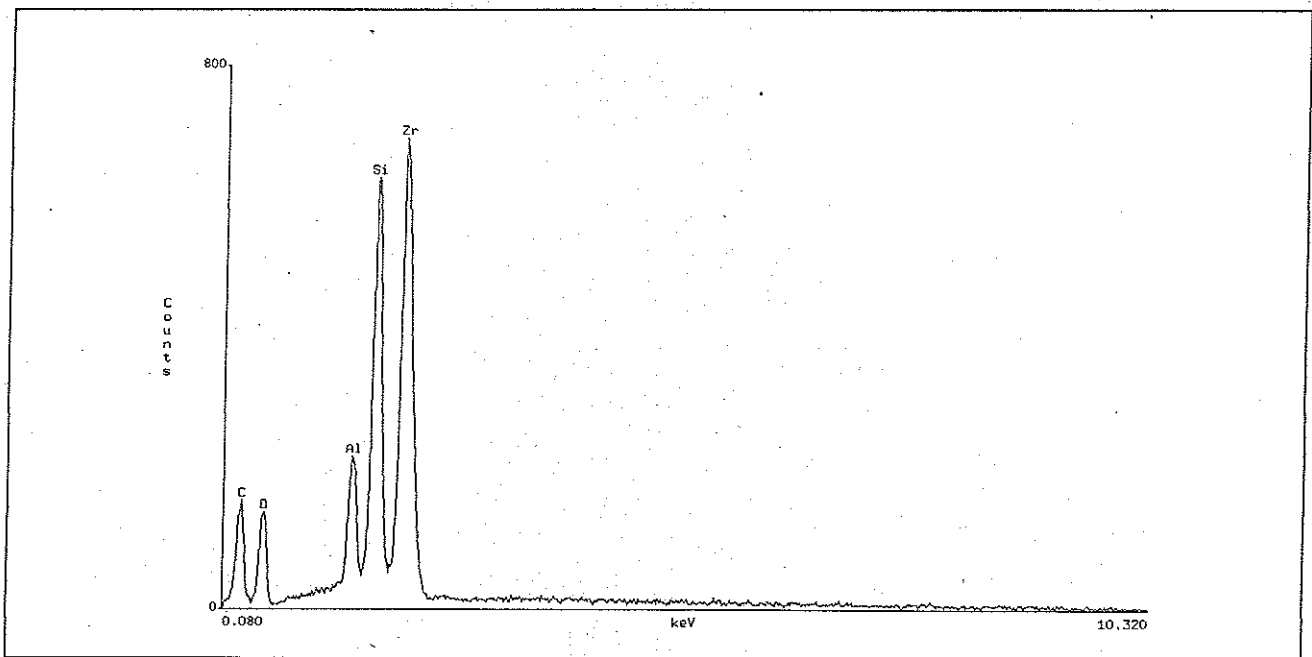


Figure 13 : photo en électrons rétrodiffusés de l'inclusion



Al ₂ O ₃	SiO ₂	ZrO ₂
8.64%	30.28%	61.08%

Figure 14 : spectre EDS d'une inclusion à zircon (20 kvolt)

L'inclusion observée est donc un minéral de zircon. Les autres inclusions de ce grain sont aussi majoritairement des zircons. L'aluminium observé sur le spectre est du à l'émission aluminium du corindon hôte. On remarque que tous ces zircons sont de forme ronde, automorphe ; on peut donc penser qu'il s'agit de zircons hérités. Cependant, nous avons pu observer des zircons zonés dont voici le spectre et les photographies :

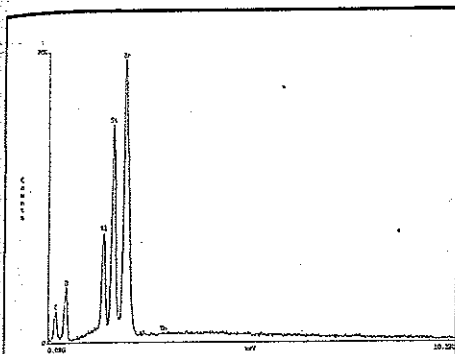


Figure 15 : spectre EDS d'une inclusion solide de zircon zoné

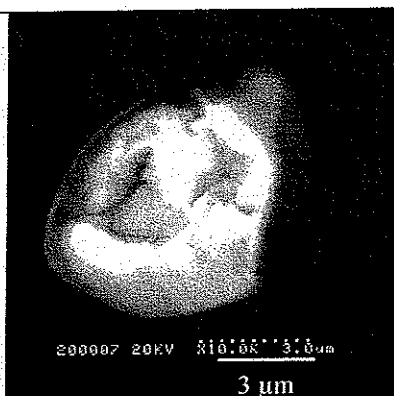


Figure 16 : photo de l'inclusion en électrons rétrodiffusés

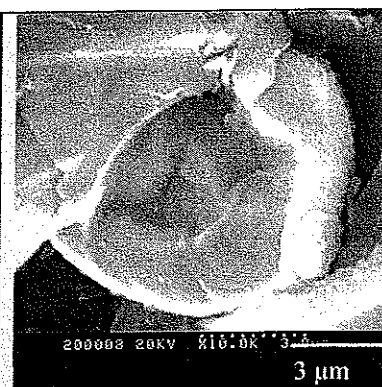


Figure 17 : photo de l'inclusion en électrons secondaires

Ces zircons contiennent un peu de thorium. Leur histoire est donc sûrement plus complexe que ce que l'on avait imaginé (coeur ancien contenu dans une roche sédimentaire qui a ensuite subi une phase de métamorphisme durant laquelle le zircon a continué de croître mais avec un chimisme différent).

Ces zircons peuvent servir à dater la roche. En effet, leur taille supérieure à 30 μm permet d'utiliser une méthode de datation isotopique couplée à l'utilisation d'une sonde ionique.

2.1.3.2. Etude des saphirs du gisement de Vatondry

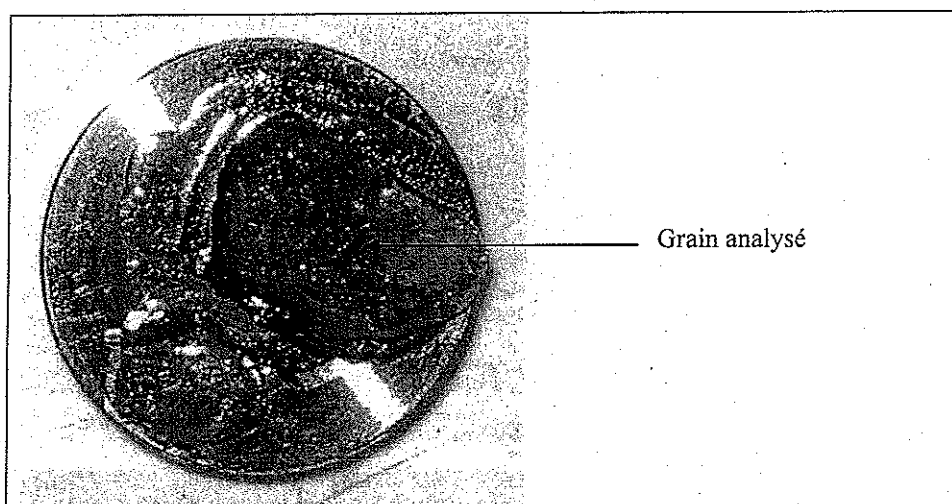


Figure 18 : deuxième inclusion de grains de saphir en résine étudiée au MEB

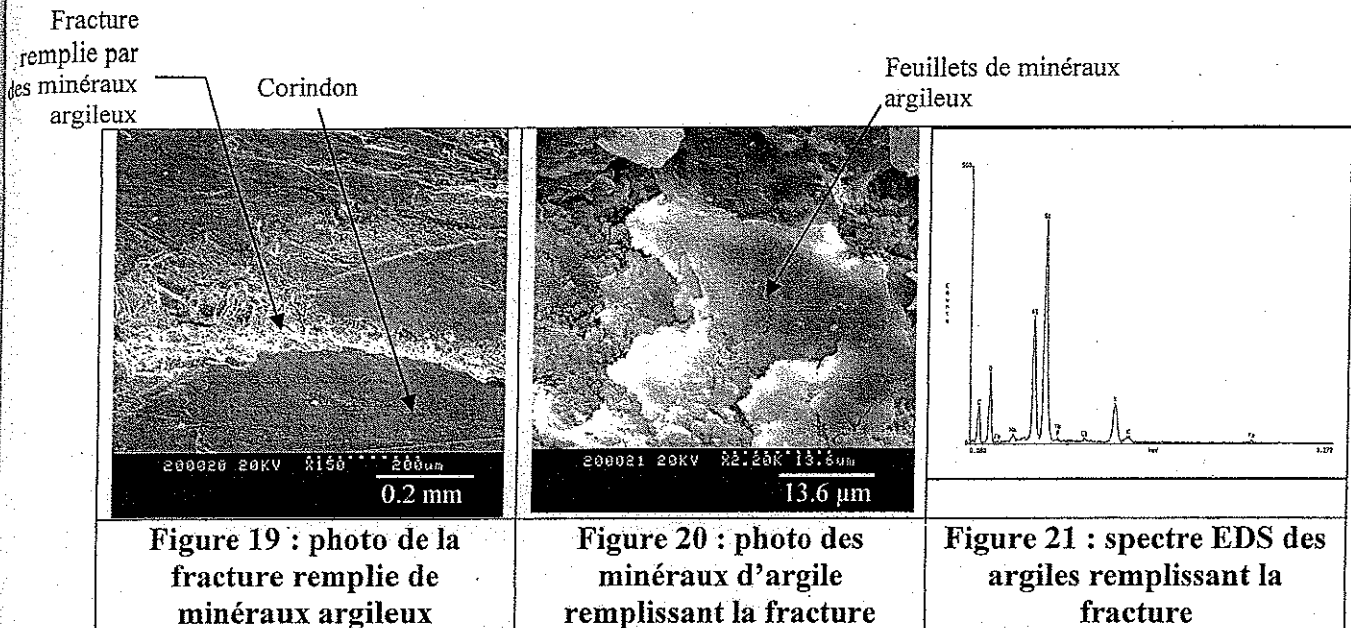
Ici aussi, de nombreuses inclusions solides sont des zircons. Nous avons pu observer les niches d'arrachements de ces derniers, la forme quadratique est encore bien visible. Nous remarquons cependant des inclusions solides d'une autre nature que le zircon :

une inclusion de phosphate de terre rare légère, la monazite (REEPO_4).

des inclusions de feldspaths potassiques (orthose)

une inclusion de mica blanc (phengite) associée à une autre phase contenant principalement du fer mais aussi de l'aluminium, du silicium et du chlore non déterminée.

le remplissage de fractures recoupant le corindon par des minéraux argileux dont la forme en feuillet est très reconnaissable (kaolinite) et par de la monazite qui témoigne d'une circulation de fluides qui ont altéré le corindon mais pas la monazite qui s'est alors retrouvée dans les produits de recristallisation des fractures.



Il y a donc eu argilisation d'un minéral, probablement un feldspath potassique, qui remplissait les fractures du corindon.

En conclusion, nous avons vu que l'étude des inclusions solides peut nous donner des indices sur l'origine et la formation des saphirs et rubis étudiés. Les zircons hérités de roches sédimentaires dans les corindons de Sahambano sont indicateurs d'une histoire complexe. Ces zircons peuvent aussi permettre de dater la roche.

2.2. Caractérisation d'inclusions solides et fluides par le RAMAN

2.2.1. Origine des échantillons analysés

Nous avons eu l'opportunité de manipuler le Raman sur un rubis de Mogok (Birmanie) provenant de marbres. Cette analyse nous permet d'approcher les techniques de cette microsonde. Elle met aussi en avant la démarche scientifique qui permet de comprendre les modes de formation d'un minéral à travers la caractérisation des inclusions fluides.

De plus, les modes de formation entre ces rubis et certains provenant de Madagascar sont similaires.

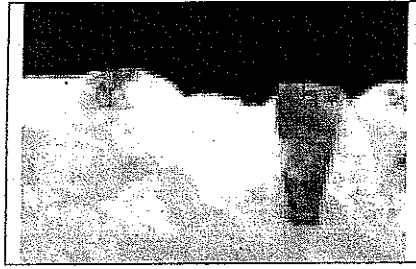


Figure 22 : Photo d'un rubis dans sa gangue de marbre blanc similaire à celui étudié en lame épaisse à la microsonde Raman

Nous avons donc cherché à caractériser les inclusions fluides et les inclusions solides afin de connaître les modes de formation de ces corindons.

Nous voulons retrouver tous les éléments qui sont typiquement associés aux rubis déjà rencontrés dans les marbres pour pouvoir valider un modèle de formation. Jusque là, nous n'avons trouvé, dans les rubis de Mogok, ni nitrate ni carbonates de sodium. La présence de ces sels est nécessaire pour abaisser la température de fusion et permettre donc la cristallisation de rubis dans les marbres.

2.2.2. Principe de fonctionnement

La microsonde Raman permet de visualiser une surface ou un volume de la taille d'un micron puis d'en identifier la nature chimique (moléculaire ou structurale). Il est intéressant de noter que ces informations structurales ne peuvent être obtenues par aucune autre technique.

L'échantillon, présenté sous forme de lame épaisse, est placé sur la platine d'un microscope où il est observé en lumière transmise ou réfléchi. On envoie ensuite un faisceau laser monochromatique bleu (ici) à travers le microscope sur la zone examinée.

Avec une certaine fréquence, le laser excite les liaisons entre deux atomes précis, alors que le reste de la molécule reste quasi statique. Cela induit un transfert d'une partie de l'énergie du faisceau laser sur l'édifice moléculaire pour le faire vibrer de manière spécifique. La liaison a donc un état d'énergie un peu plus haut que l'état initial.

Un détecteur reçoit la lumière diffusée, préalablement filtrée, et permet d'établir un spectre.

Ci-dessous, la figure 23 montre le principe de fonctionnement de la microsonde Raman.

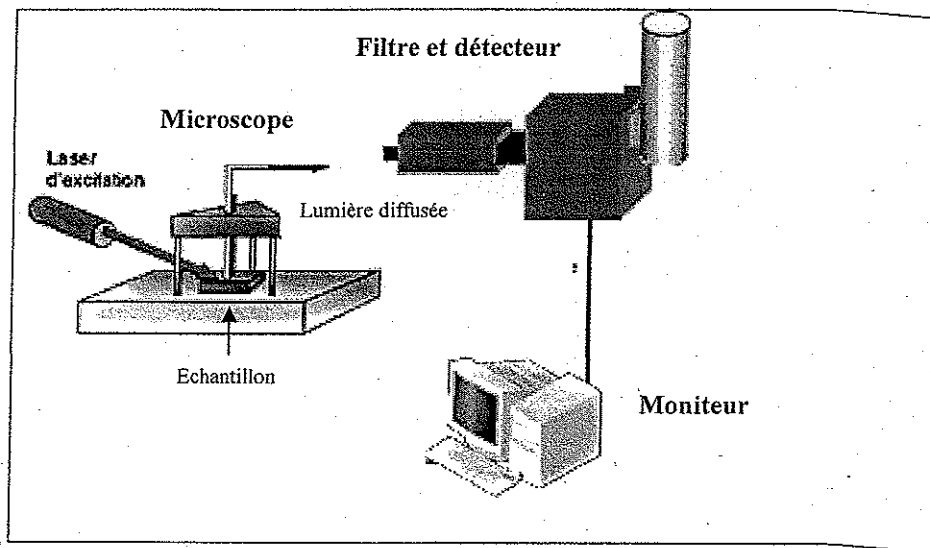


Figure 23 : Principe de fonctionnement de la microsonde RAMAN

Il est important que l'utilisateur ait à sa portée une bibliothèque de spectres lui permettant d'indexer les pics caractéristiques d'un minéral donné. C'est ainsi qu'avec l'expérience, il peut retrouver les réponses spectrales de chaque minéral et compléter sa banque de données.

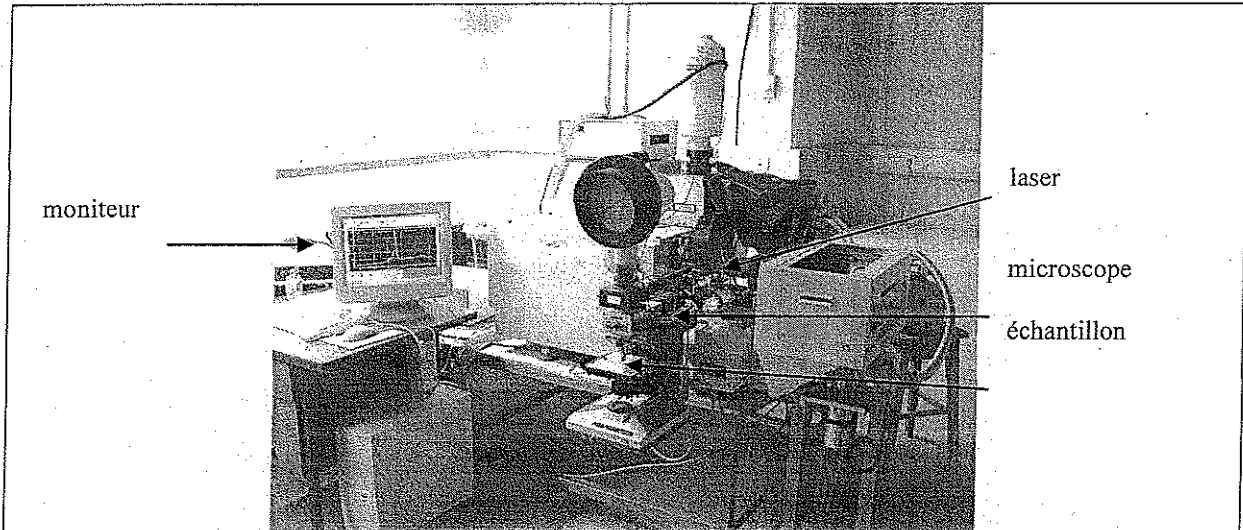


Figure 24 : Photo de l'appareillage de la microsonde Raman

Cette technique est complémentaire de la spectroscopie infrarouge car certaines liaisons sont excitées avec une des deux méthodes mais pas avec l'autre et inversement.

2.2.3. Résultats

2.2.3.1. Image de l'inclusion fluide

L'échantillon de rubis a été sélectionné pour la présence d'une inclusion fluide, visible macroscopiquement. L'appareillage associé au Raman nous permet d'avoir une image nette de l'inclusion, en figure 25.

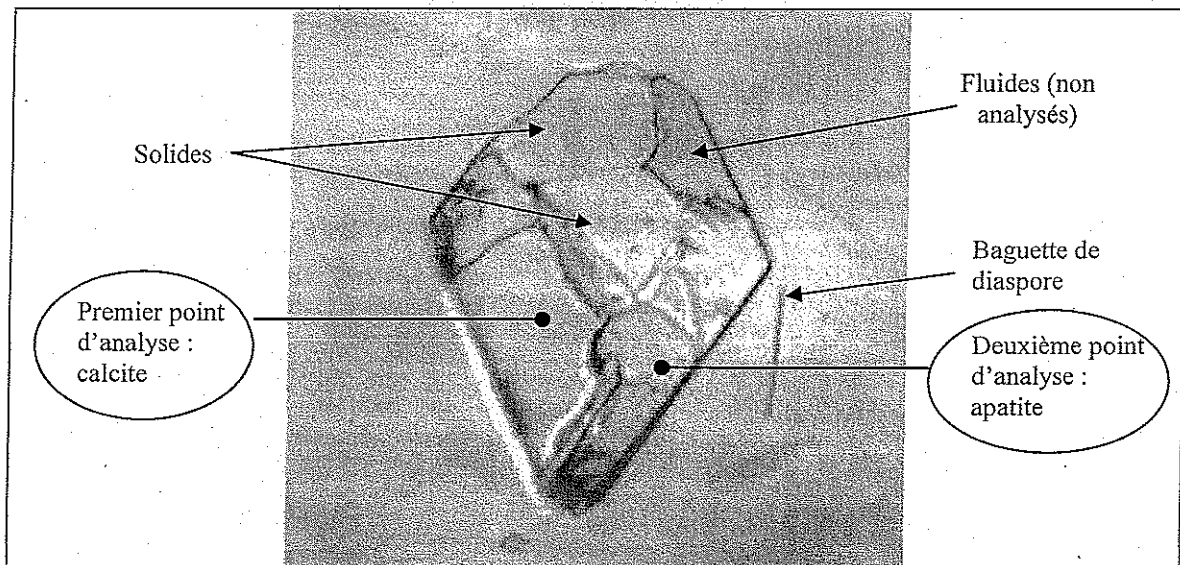


Figure 25 : Inclusion fluide multisolides dans un rubis de Mogok

La forme losangique de l'inclusion montre que le fluide a été piégé pendant la croissance du minéral. En effet, les baguettes (qui peuvent être composées de diaspore, rutile, ilménite ou beumite) entre lesquelles les inclusions de ce type sont piégées soulignent les plans de croissance.

2.2.3.2. Spectre du rubis

La première étape est de caractériser le spectre du rubis (déjà connu par l'utilisateur) car le faisceau laser traverse d'abord le rubis avant d'exciter l'inclusion.

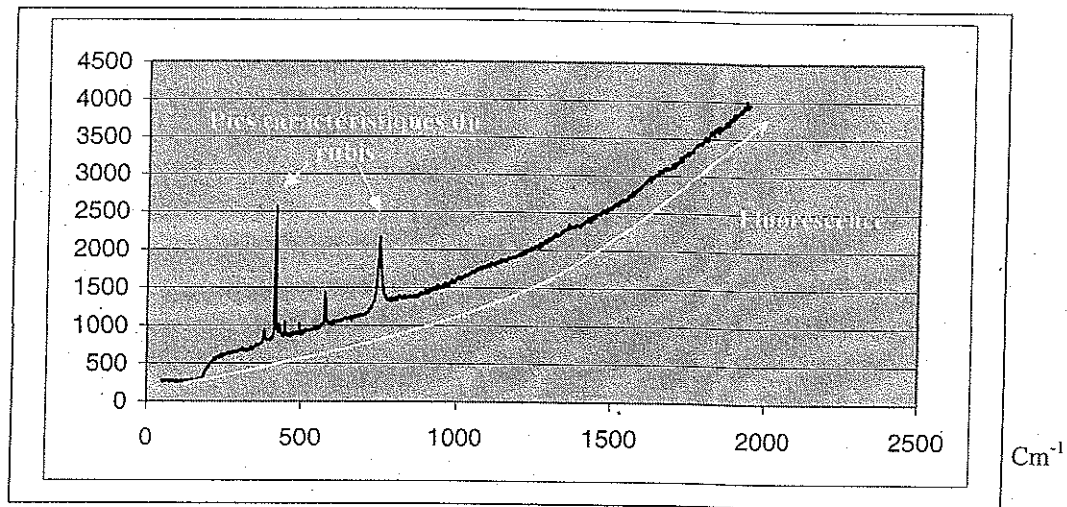


Figure 26 : Spectre du rubis de Mogok

Le rubis possède deux pics caractéristiques majeurs. Ainsi, ils se retrouveront, avec une amplitude plus ou moins grande, sur tous les spectres. La méthode à suivre est donc de superposer à chaque mesure le spectre trouvé et le spectre du rubis pour repérer les pics qui pourraient être caractéristiques d'un minéral de l'inclusion. De plus, la forte fluorescence du rubis ne permet pas d'observer les hautes fréquences (il y a saturation au-delà de 2000 Cm^{-1}).

2.2.3.3. Premier point d'analyse

Le premier point d'analyse se trouve sur un solide en bas à gauche de l'inclusion (cf figure 25). Le spectre est le suivant :

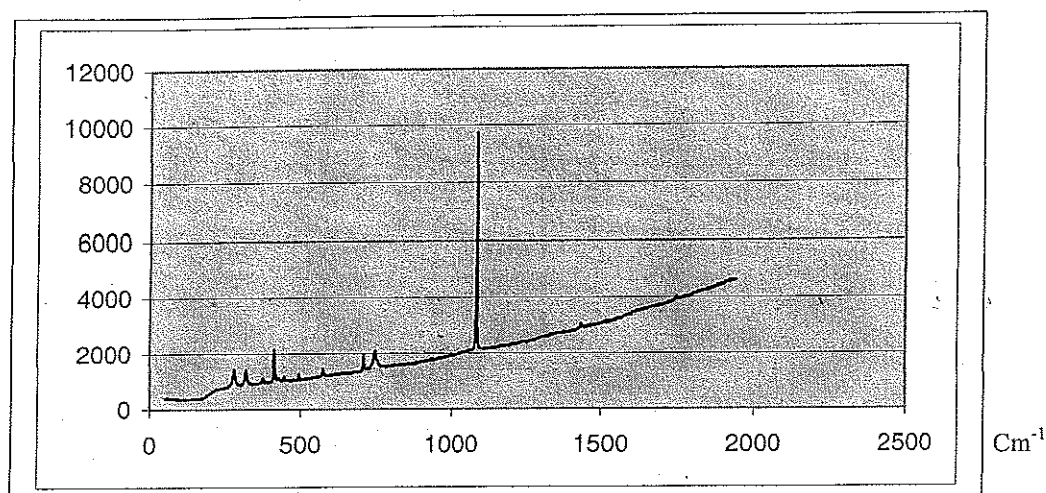


Figure 27 : Spectre du premier point d'analyse : calcite

On observe un pic majeur à 1083 Cm^{-1} . Généralement, la présence de pics dans deux zones : une aux environs de $1000-1100 \text{ Cm}^{-1}$ et l'autre dans la zone $200-300 \text{ Cm}^{-1}$ est typique d'un carbonate.

Nous avons ici affaire, sans hésitation, à de la calcite.

2.2.3.4. Deuxième point d'analyse

Le deuxième point d'analyse se trouve sur un solide en bas à droite de l'inclusion (cf figure 25). Le spectre est le suivant :

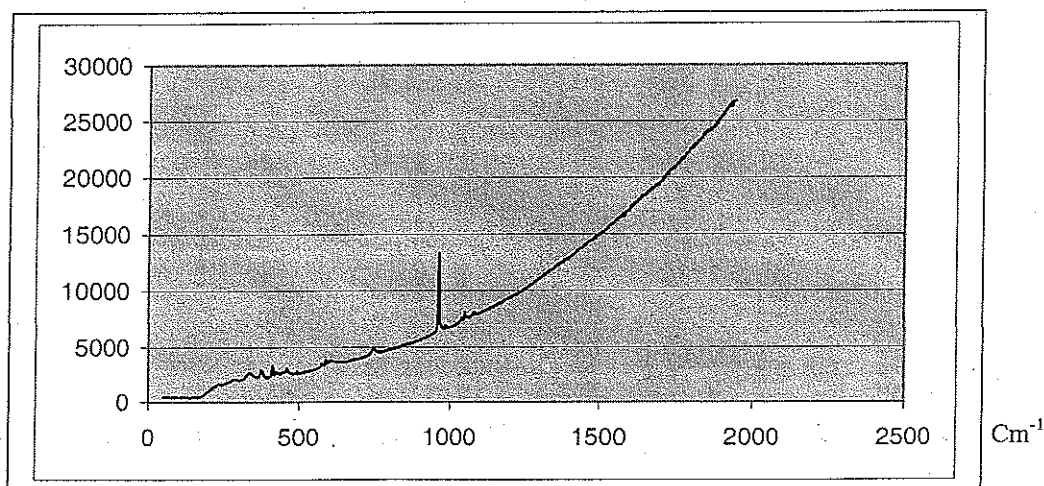


Figure 28 : Spectre du deuxième point d'analyse : apatite

Le pic majeur à 970 Cm^{-1} est caractéristique de l'apatite.

2.2.3.5. Conclusions

Comme nous l'avons vu précédemment, c'est par une étude bibliographique de la banque de données des spectres Raman que certaines indéterminations pourront être levées. En effet, durant cette séance, certains spectres sont apparus plusieurs fois dans l'inclusion (il s'agit donc bien d'une espèce minérale pour l'instant non déterminée).

Nous avons donc pu identifier dans l'inclusion de la calcite et de l'apatite. La calcite est liée à l'environnement de formation du rubis de Mogok : une simple dissolution des carbonates des marbres environnants explique leur présence. L'apatite est un phosphate de calcium dont la présence est encore non expliquée.

Enfin, nous n'avons pas pu mettre en évidence ni carbonate de sodium ni nitrate.

CONCLUSION

La synthèse bibliographique nous a permis de voir que les principaux gisements de gemmes à Madagascar se situaient dans les pegmatites, qui ont, de ce fait, une énorme importance économique. Le mode de mise en place de ces pegmatites et la minéralisation sont des phénomènes complexes et variables d'un gisement à un autre. Ceci amène parfois à des difficultés d'exploitation. Le deuxième type de gisement économiquement important sont les placers et notamment, celui d'*Ilakaka* où l'on retrouve une grande diversité de gemmes (saphirs, rubis, émeraudes, grenats, tourmalines,...). Ce type de gisement est facile à exploiter et les gemmes sont de bonne qualité.

Madagascar possède donc d'énormes richesses en minéraux et gemmes, largement exploitées depuis le début du XX^{ème} siècle, ce qui la place parmi les premiers rangs mondiaux des producteurs de gemmes.

Cependant, les exploitants, souvent étrangers, sont peu respectueux des droits du travail des mineurs malgaches et du respect de l'environnement.

Le travail en laboratoire nous a permis d'appréhender la formation des gisements à travers l'étude expérimentale des inclusions fluides et solides et nous a aussi permis d'approcher la démarche scientifique.

Ce projet nous a fortement plu car il nous a permis d'apprendre beaucoup dans un domaine où nous en savions peu : les gemmes et leurs gisements. Enfin, la future utilisation du CDrom produit nous a largement motivé.