

DIPLÔME D'UNIVERSITÉ DE GEMMOLOGIE

ANNÉE 1993

ÉTUDE DU GISEMENT D'ÉMERAUDE DE MANANJARY (MADAGASCAR)

par

Nadine RANOROSOA

Docteur ès Sciences naturelles

*Laboratoire de Minéralogie - Pétrographie
Direction de la Géologie d'Antananarivo
Ministère de l'Énergie et des Mines
Madagascar*

Soutenu publiquement le 9 décembre 1993
au département de Géologie de l'U.F.R. des sciences et des techniques de l'Université de Nantes

devant la commission d'examen

<i>Président</i>	M. B. LASNIER
<i>Examineurs</i>	M. J.-P. POIROT
	M. M. SPIESSER
	M. M.-N. OSTROUMOV
	M. J.-P. GAUTHIER
<i>Invité</i>	M. P. CARIO

Table des matières

	Pages
I. - Introduction	
I.1- Localisation géographique	6
I.2- Travaux antérieurs	6
I.3- Conditions et buts de l'étude	8
I.4- Contexte géologique	8
I.4.1- Place dans le Précambrien Malgache	
I.4.2- Environnement pétrographique	
II.- Etude minéralogique des associations minérales	
II.1- Etude au microscope polarisant	11
II.2- Analyse au M.E.B. et discussion	12
III.- Etude de l'émeraude	
III.1- Analyse chimique	15
III.2- Analyses spectrales	17
III.3- Etude des inclusions	23
IV.- Conclusion	27
ANNEXES	29
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	57

REMERCIEMENTS

Je dois une reconnaissance particulière à Messieurs:
RATSIMBAZAFY J.R., Directeur de la Géologie au Ministère de l'Energie et des Mines de Madagascar,
B. LASNIER, Directeur du Laboratoire de Gemmologie de Nantes,
J.M. REGNOULD, Conseiller Technique auprès de la Direction Générale de l'Energie et des Mines de Madagascar,
pour leur confiance, leur soutien et leur contribution à ma présence en stage à Nantes.

Je remercie vivement M. LASNIER pour ses encouragements, sa grande disponibilité, et pour avoir accepté la gageure de diriger ce mémoire pendant la période, combien très courte, de mon stage à Nantes.

C'est à la Société "LE QUARTZ", en particulier à Mme ANDRIANJAFY M., Président Directeur Générale de la Société, que je dois la possibilité de traiter ce sujet très intéressant; je lui présente tous mes remerciements, pour m'avoir gracieusement permis d'accéder aux échantillons et documents concernant le gisement.

Je dois toute ma reconnaissance à M. J.P. CARIO, Ingénieur aux Ponts et Chaussées à Nantes, pour avoir mis à ma disposition des échantillons d'émeraudes provenant de l'un des gisements de la Société. C'est à lui que je dois l'étude la plus passionnante de ce mémoire.

Je remercie également:

M. D. PIAT, pour avoir mis à ma disposition, par l'intermédiaire de M. LASNIER, des photos de gisements de Mananjary.

M. M.N. OSTROUMOV, Minéralogiste-Gemmologue de l'Institut de St. Pétersbourg, pour la réalisation des spectres.

Les Membres (personnels enseignant et technique, thésards) du Laboratoire de Gemmologie, Laboratoire de Pétrologie Structurale et de Géologie, de l'Institut des Matériaux de Nantes et de l'Institut National de Bijouterie de Saumur, pour leur accueil sympathique. Messieurs. R. DERVAL, E. BOEUF, A. COSSARD et A. BARREAU ont amicalement contribué à ce que je puisse soutenir ce mémoire à temps.

La promotion 93-94 de la Formation Continue, pour les relations amicales et professionnelles que nous avons su créer.

Pour avoir accepté de juger ce travail, je remercie, Messieurs J.P. POIROT, Directeur du Service Public du Contrôle des Diamants, Perles Fines et Pierres Précieuses (Chambre de Commerce et d'Industrie, Paris), M. SPIESSER, Professeur à l'Institut des Matériaux de l'Université de Nantes, M.N. OSTROUMOV, Professeur à l'Institut de St. Pétersbourg et J.P. GAUTHIER, Professeur à l'Université de Lyon.

Un grand Merci à ma fille, Hasina, à qui je dédie ce mémoire, et à ma famille pour leur soutien moral.

I - INTRODUCTION

Le premier gisement d'émeraude découvert et exploité à Madagascar est celui de Mananjary. Les carrières étudiées dans ce mémoire sont celles exploitées par la Société "LE QUARTZ". Cette Société détient, pratiquement, le monopole de l'exploitation d'émeraude de Mananjary. Elle a largement contribué au développement de la région, en transformant de petites localités d'une dizaine de toits, en village minier avec son école et dispensaire.

Cette Société possède l'un des ateliers de lapidairerie et point de vente les plus performants et les plus modernes de l'Ile; elle commercialise des gemmes, dont la qualité de la taille respecte les normes internationales.

I.1 - Localisation géographique

La région de Mananjary appartient, selon le découpage territorial actuel, à la province de Fianarantsoa, et se trouve à 250 km environ d'Antananarivo, sur la cote Sud-Est de Madagascar (Fig. I). Les deux carrières étudiées, Ambodibonary et Ambodibakoly, sont à 100 km environ au Sud de Mananjary.

I.2 - Travaux antérieurs

LACROIX en 1922 ne mentionne pas l'émeraude dans son livre intitulé "Minéralogie de Madagascar", parmi les béryls et autres minéraux de pegmatites. Cependant, l'existence de l'émeraude sur la côte Sud-Est de Madagascar, est signalée par LEVAT en 1912 et SINKANSAS en 1981 (in SCHWARZ et HENN -1992).

Le premier indice d'émeraude de Mananjary, soumis pour détermination au Service Géologique d'Antananarivo, provient de concentrés aurifères à corindon et disthène (BEHIER -1962). Il s'agissait bien d'une émeraude de qualité gemme, de deux décigrammes environ, dont la nature a été vérifiée chimiquement et physiquement. Cet échantillon provient d'Ifanadiana, à 50 km environ au Sud de Mananjary.

Les premières études analytiques sont principalement dûes à HÄNNI et KLEIN (1983) pour des minéraux de la mine d'Ankadilalana à Kianjavato, et à SCHWARZ et HENN (1992) pour des émeraudes de Morafeno. On leur doit les premières descriptions comparatives physico-chimiques et études des spectres d'absorption.

Compte tenu de ce qui a été dit précédemment, il est tout à fait probable que les minéraux étudiés par ces auteurs proviennent du permis minier que nous étudions; Ankadilalana et Morafeno constituent de petites localités regroupées dans le village de Kianjavato où se trouvent les deux carrières étudiées.

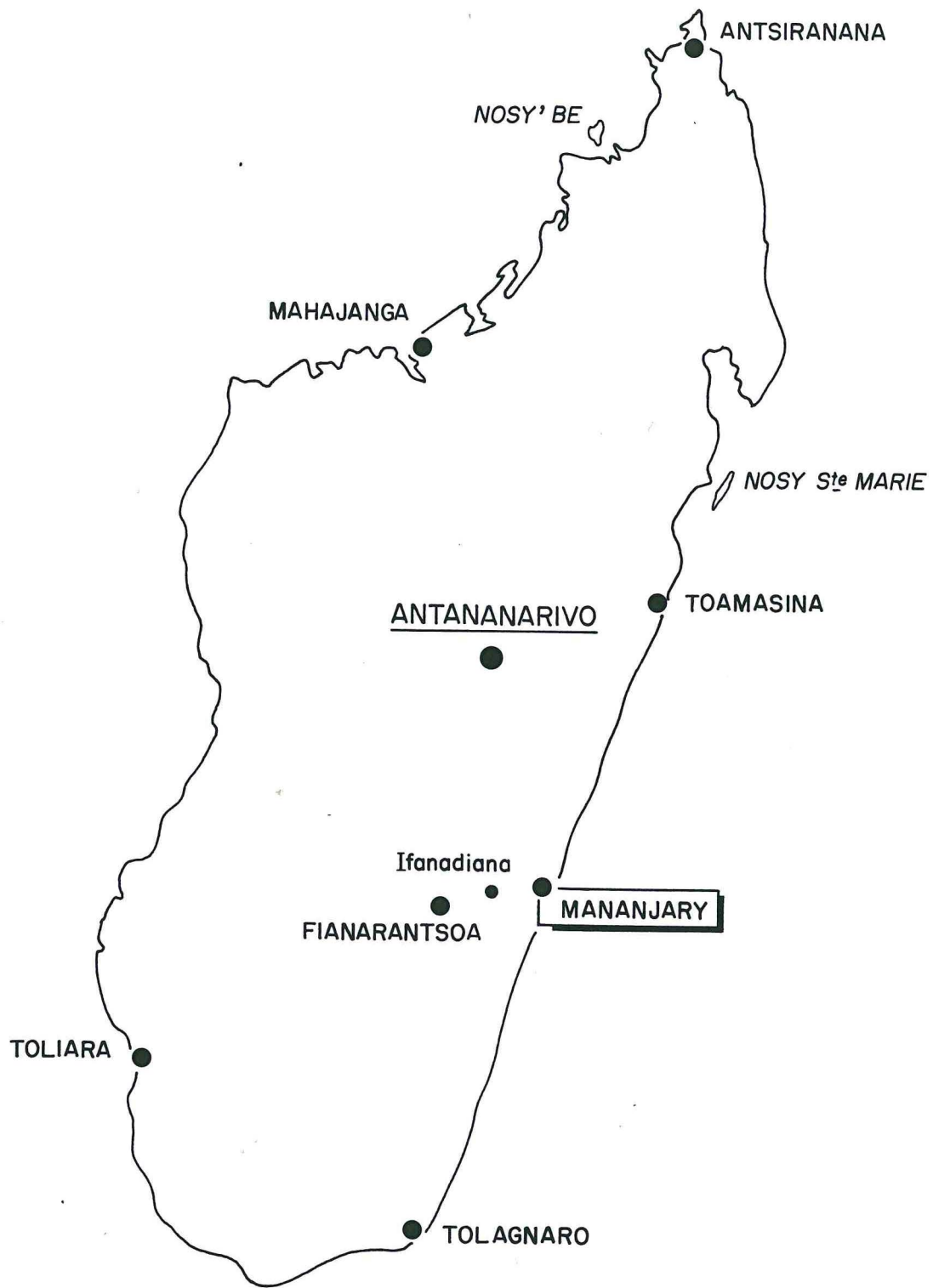


Fig.I : Localisation géographique de Mananjary

I.3 - Conditions et buts de l'étude

Nous n'avons pas effectué de travaux sur le terrain. Les échantillons ont été prélevés, en Octobre 1993, par l'ingénieur des Mines de la Société et nous ont été remis avec des schémas de prélèvement dans les carrières.

L'échantillonnage comporte un ensemble de roches prélevées dans:

- 3 lentilles minéralisées (A21- A22- A23) et l'encaissant (A24) d'Ambodibonary (Fig.II)
- 2 lentilles minéralisées (B11- B12- B13- B14) d'Ambodibakoly (Fig.III).

(Les lettres A et B correspondent au code de liaison B.L.U. de la Société à chaque carrière).

Pour définir les caractères gemmologiques de l'émeraude, nous avons disposé de deux cristaux provenant de la collection minéralogique de Mr. P. CARIO, prélevés dans le permis minier étudié.

Le but de ce mémoire est de caractériser l'émeraude de Mananjary en la plaçant dans son contexte géologique, afin de définir le cortège minéralogique des roches minéralisées, et des formations encaissantes, de manière à répondre à deux des soucis actuels de la Société:

- Existe-t-il un "guide" minéralogique pour suivre ou retrouver la minéralisation?
- Est-il possible de "caractériser" l'émeraude de Mananjary, afin de se protéger des tentatives de discrédit par introduction de gemmes de synthèse?

De ce fait, nous avons insisté sur un échantillonnage de l'émeraude dans sa gangue. Il faut aussi noter que le présent mémoire concerne le gisement précis de Mananjary; en effet, un autre gîte d'émeraude a été découvert dans la région de Benenitra, à l'Extrême Sud-Ouest de l'Ile.

I.4 - Contexte géologique

I.4.1 - Place dans le Précambrien Malgache.

Le Socle Précambrien Malgache, qui constitue les 2/3 de la superficie de l'Ile, a fait l'objet de nombreuses interprétations (in HOTTIN - 1976). La première est due à BESAIRIE qui décrit trois Systèmes:

- Le Système du Vohibory, terminal
- Le Système du Graphite, médian
- Le Système Androyen, basal.

Des données récentes, notamment géochronologiques, géochimiques et structurales, ont permis d'expliquer certaines divergences, discutées dans

l'interprétation de HOTTIN (1976), concernant principalement les formations du sud de l'Ile, d'ailleurs encore en étude actuellement.

Dans l'ensemble du Précambrien de Madagascar (Fig.IV), le gisement d'émeraude de Mananjary se trouve dans la série de l'Ampasary à prédominance de gneiss à amphibole, souvent grenatifères, rarement à graphite, et de migmatites. Les faisceaux de lentilles basiques et ultrabasiques sont nombreux (pyroxénolites, harzburgites, dunités), ainsi que leurs faciès dérivés (amphibolites à trémolite, actinote, serpentine).

La Série de l'Ampasary appartient au Système Mananpotsy Andriaménien, qui rassemble le Système médian du Graphite et terminal du Vohibory de l'hypothèse de BESAIRIE, et contient le plus grand gisement de chromite, en exploitation, de Madagascar: Andriamena; il est aussi réputé pour ses gisements aurifères et nickelifères (Massif de Valozoro).

Cette Série a été affectée par l'Orogénie Shamwaienne (2600 + 200 MA), et le volcanisme basique et ultrabasique à chrome, nickel et or, est lié à cette Orogénie.

Ainsi, le contexte géologique général, présence de roches basiques et ultrabasiques chromifères, peut expliquer la source du Cr dans les émeraudes de Mananjary.

Par comparaison, le gisement d'émeraude de Benenitra se trouve dans la Série du Vohibory, caractérisée par l'abondance des amphibolites, gneiss amphibolo-pyroxéniques, leptynites fréquemment pyriteuses et cipolins. Elle a été affectée par l'Orogénie Kibarienne (1100 + 200 MA), à laquelle sont liés de nombreux alignements d'ultrabasites qui recoupent la Série.

I.4.2 - Environnement pétrographique

A l'échelle du gisement, les carrières d'Ambodibonary (Fig.II) et d'Ambodibakoly (Fig.III) se trouvent dans des gneiss, très plissés et recoupés par des quartzites et des pegmatites quartzo-feldspathiques.

La minéralisation se trouve dans des schistes à biotite, parfois enrichis en amphibole, formant des lentilles dans les gneiss, et recoupés par des filonnets de 2 à 10 cm d'épaisseur, de quartzite monominéral et de pegmatite quartzo-feldspathique. Les schistes contiennent parfois des intercalations de roches d'altération, montrant un rubanement rouge ocre et gris.

L'observation macroscopique montre que la minéralogie des schistes minéralisés sont très différentes dans les deux carrières:

- à Ambodibonary, la biotite est toujours associée à l'amphibole, pyrite et carbonate de couleur blanche; ces deux derniers minéraux peuvent, parfois, former des grains de 0,5 à 1 cm de diamètre environ.
- à Ambodibakoly, les schistes à biotite et carbonate de couleur rose en grains millimétriques.

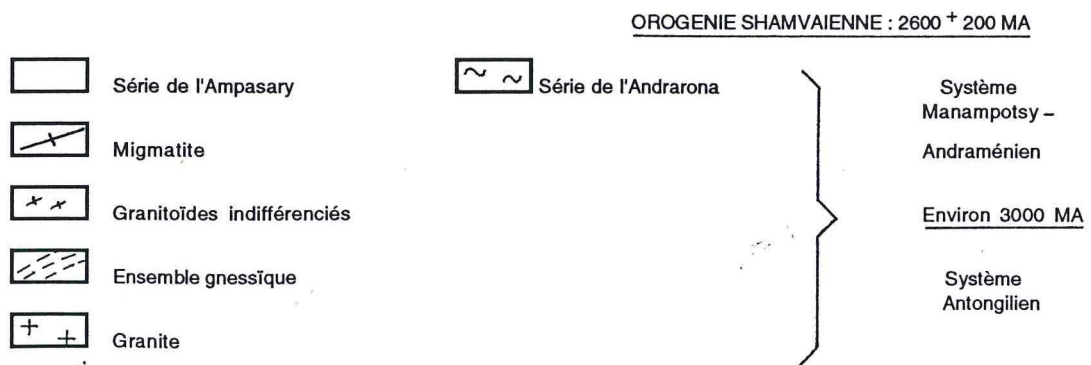
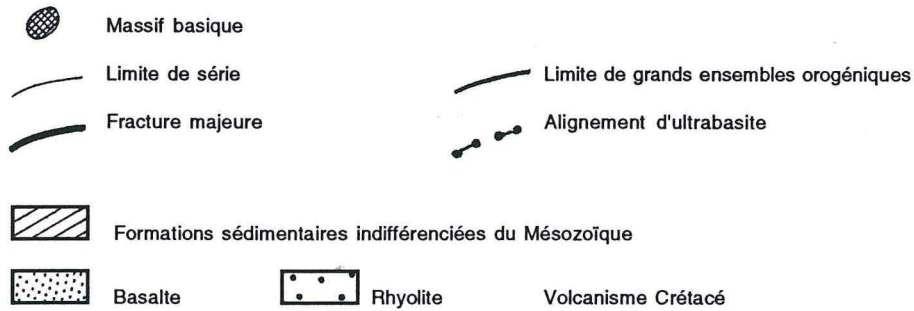
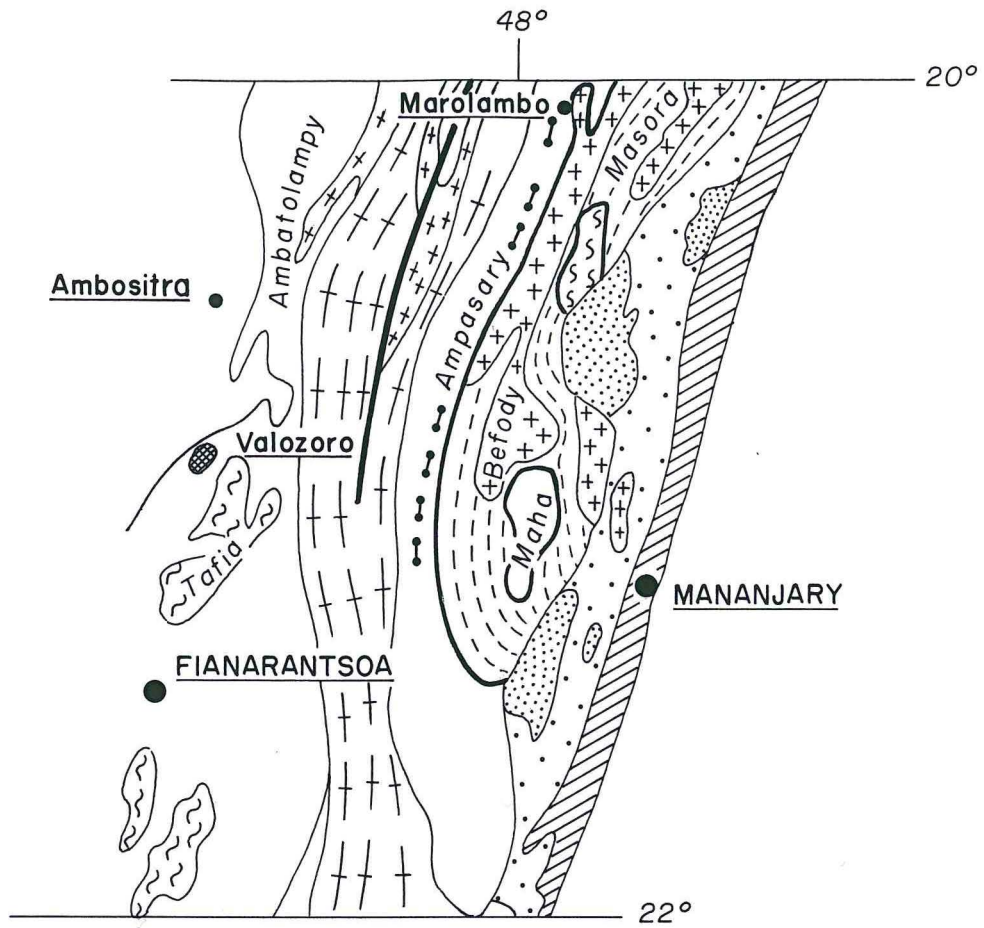


Fig.IV : Place du gisement de Mananjary dans le Précambrien Malgache (Extrait de la carte de HOTTIN-1976)

II - ETUDE MINÉRALOGIQUE DES ASSOCIATIONS MINÉRALES

Dans cette partie, nous allons donner la composition minéralogique des schistes à émeraude et de son environnement; elle est basée sur des observations de lames polies (13 lames) au microscope polarisant, et des analyses au M.E.B., en dispersion d'énergie (Tracor).

II.1 - Etude au microscope polarisant

II.1.1 - L'environnement géologique

Les gneiss sont à plagioclase et quartz; les minéraux ferromagnésiens sont représentés par la biotite brune et l'amphibole verte. Par endroit, le gneiss devient amphibolique, par l'apparition d'une amphibole vert-bleuâtre. Comme minéraux accessoires, on a le sphène et/ou épidote (pistachite), ilménite et/ou pyrite et chalcopyrite, et le zircon formant une auréole pléochroïque dans la biotite.

Les quartzites, qu'ils recoupent les gneiss ou les schistes, sont toujours monominéraux. Au contact, la biotite est chloritisée et déferritisée, les plagioclases sont séricitisés.

La roche d'altération est essentiellement à limonite et à micas; la structure est sphérulitique.

II.1.2 - Les schistes

Les schistes de la carrière d'Ambodibonary

Ce sont des schistes à biotite verdâtre, contenant toujours de l'amphibole verte, muscovite, clinocllore, quartz, plagioclase et carbonate; accessoirement, on trouve le rutile, apatite, zircon, pyrite et autres minéraux opaques. La biotite est plus ou moins chloritisée et déferritisée. Elle présente une extinction ondulante, avec " kinck-band", tout comme le quartz et les plagioclases d'ailleurs. Les amphiboles sont souvent truffées d'inclusions de carbonate, biotite, chlorite et plagioclase. Le plagioclase est fréquemment séricitisé.

Les schistes de la carrière d'Ambodibakoly

Ce sont toujours des schistes à biotite, mais celle-ci est brune et moins chloritisée; les autres minéraux sont très accessoires: amphibole vert-bleuâtre, quartz, plagioclase séricitisé, grenat et apatite, et, plus rarement encore, le zircon, goethite, pyrite et autres minéraux opaques.

On remarque que les minéraux sont moins altérés (chloritisation ou séricitisation), même l'extinction ondulante des biotites est peu accentuée. La chlorite est absente; l'apatite et le carbonate forment des plages souvent intersticielles, étirées dans la schistosité. Les halos pléochroïques sont très fréquents dans la biotite.

II.2 - Analyse au M.E.B. et discussion

Malgré la présence de l'émeraude, visible à l'oeil nu dans les schistes, il a été très difficile de la retrouver dans les lames; ceci est probablement dû à des arrachements des grains, souvent millimétriques, au cours du polissage.

Nous ouvrons d'ailleurs une parenthèse sur la difficulté de l'identification de l'émeraude (et même du béryl), en lame polie : en effet ce minéral très faiblement pléochroïque et uniaxe négatif, est difficile à différencier du quartz, dans la mesure où, dans ces schistes très tourmentés et où tous les minéraux ont une extinction ondulante, la biaxie anormale du béryl est très accentuée rendant toute mesure incertaine.

Pour parer à cette incertitude, nous avons passé les lames polies (les minéraux en grains également), au filtre de Chelsea et au luminoscope; nous n'avons constaté aucune réaction. Cependant, cette absence de réaction est connue pour des minéraux contenant du fer, comme c'est le cas des émeraudes de Mananjary, mais de plus, elle semble normale pour des émeraudes naturelles d'après le tableau des couleurs de cathodoluminescence des gemmes sélectionnées de GAART (1976) (in CHALAIN -1992).

Nous avons donc confirmé la présence de l'émeraude, en vérifiant les caractères optiques en frottis et diffractométrie X. Il s'agit bien d'un béryl, uniaxe négatif, à indice de réfraction moyen voisin de 1,57 et dont le diagramme des raies correspond à la fiche A.S.T.M. 9-430.

A l'exception des gisements du Brésil, très peu d'ouvrages donnent la composition minéralogique des schistes à émeraude. Si les carbonates sont signalés parmi les minéraux en inclusion dans l'émeraude à Sòcòtò, Bahia (SCHWARZ et al -1990) et à Belmont Mine, Minas Gerais (HÄNNI et al.-1987), ils n'ont pas été signalés parmi les constituants minéralogiques des phlogopitites à émeraude. En effet, dans ces mines, les carbonates sont localisés dans les serpentinites encaissantes, (RUDOWSKI, 1989); cependant, le même auteur décrit des phlogopitites à dolomite, mais sans émeraude, dans la zone au contact avec la serpentine, dans le Garimpo de Brauliau Brésil.

A Mananjary, il est difficile d'expliquer la présence des carbonates qui, pourtant, constituent des plages bien individualisées, sans aucune forme interstitielles rappelant une origine secondaire deutéritique. De plus, le gneiss encaissant ne contient pas de carbonate.

Les diagrammes des analyses semi - quantitatives obtenus au M.E.B. se trouvent dans l'annexe II.

Des photographies des associations minérales dans les gneiss encaissants et les schistes sont données dans l'annexe III.

La biotite appartient à la série phlogopite/ biotite.

Le carbonate est une calcite.

L'amphibole est calcique, et appartient à la série trémolite/ferroactinote; la variété verte, présente dans les schistes d'Ambodibonary est plus ferrifère et se rapproche du pôle ferroactinote; la variété vert-bleuâtre, dans les schistes d'Ambodibakoly est plus magnésienne et se rapproche du pôle trémolite. Les deux variétés d'amphibole se retrouvent dans les gneiss encaissants.

Remarque: Dans les analyses semi-quantitatives au M.E.B., il faut apporter une certaine correction, dûe notamment à une interférence du minéral hôte, concernant, par exemple, les éléments comme le Cr et Al. Pour les minéraux étudiés, nous avons effectué au moins deux points d'analyses.

La composition minéralogique des schistes à émeraude des deux carrières peut se schématiser comme suit:

	<i>Ambodibonary</i>	<i>Ambodibakoly</i>
Minéraux abondants	- Phlogopite (brune) - Ferroactinote/trémolite (verte)	- Phlogopite (verte)
Minéraux secondaires	- Calcite (blanche) - Quartz - Plagioclase - Pyrite	- Calcite (rose) - Trémolite/ferroactinote (vert-bleuâtre) - Plagioclase - Quartz

En comparant les résultats analytiques, on peut dire que:

- La phlogopite des gneiss encaissants est plus ferrifère et moins magnésienne que celle des schistes à émeraude.
- La phlogopite d'Ambodibonary contient plus de Al, Si et K que celle d'Ambodibakoly.
- L'amphibole d'Ambodibonary est plus riche en Fe et Al et plus pauvre en Mg que celle d'Ambodibakoly

- La calcite d'Ambodibonary contient du Mn, Mg et Fe.

En considérant, d'abord les observations de RUDOWSKY (1989) sur l'évolution globale de la composition chimique de la phlogopite et amphibole, et sur les caractéristiques particulières des minéraux (présence de halo, différence de couleur) dans les phlogopites à émeraude du Brésil, à savoir:

- un enrichissement en Si et Mg, et un appauvrissement en Al et Fe dans les phlogopites, depuis les zones externes (proches de l'encaissant) vers les zones internes (proches des pegmatites).
- un enrichissement en Al et Fe, et un appauvrissement en Mg et Si dans les amphiboles, depuis les zones internes vers les zones externes.
- une différence de couleur, systématique, entre les phlogopites, brunes dans les zones externes et vertes dans les zones internes.
- une apparition et fréquence des halos pléochroïques, provoqués par les minéraux métamictes (zircon, monazite), vers les zones internes.

et en comparant avec la tendance de la composition chimique, et les observations au microscope polarisant des minéraux principaux (fréquence de halos dans la phlogopite, différence de couleur des amphiboles) des gneiss encaissants et schistes à émeraude de Mnanjary,

on peut dire que:

- *La minéralisation en émeraude est localisée dans les schistes à phlogopite*
- *Les zones les plus favorables se trouvent au contact des pegmatites*

III - E T U D E D E L' E M E R A U D E

Dans les échantillons fournis par la Société, les émeraudes sont de petites dimensions, ne dépassant pas 1 mm de diamètre environ; sur les émeraudes des carrières d'Ambodibonary et d'Ambodibakoly, nous avons effectué des analyses spectrales par réflexion. Pour les analyses chimiques au M.E.B., les analyses spectrales par absorption et l'étude des inclusions solides et fluides, nous avons disposé de deux cristaux bruts de 3 cm de long et 1 cm de diamètre maximum environ, de plus ou moins bonne qualité.

Les travaux antérieurs donnent les caractéristiques gemmologiques suivants pour les émeraudes de Mananjary:

- Densité : 2.75 à 2.80
- Indice de réfraction : 1.58 à 1.59
- Biréfringence : 0.008.

Les gammes de couleur vont du vert pâle au vert saturé avec une nuance de bleu.

III.1 - A n a l y s e c h i m i q u e.

La figure V donne le diagramme de l'analyse chimique semi-quantitative de l'émeraude. On remarque:

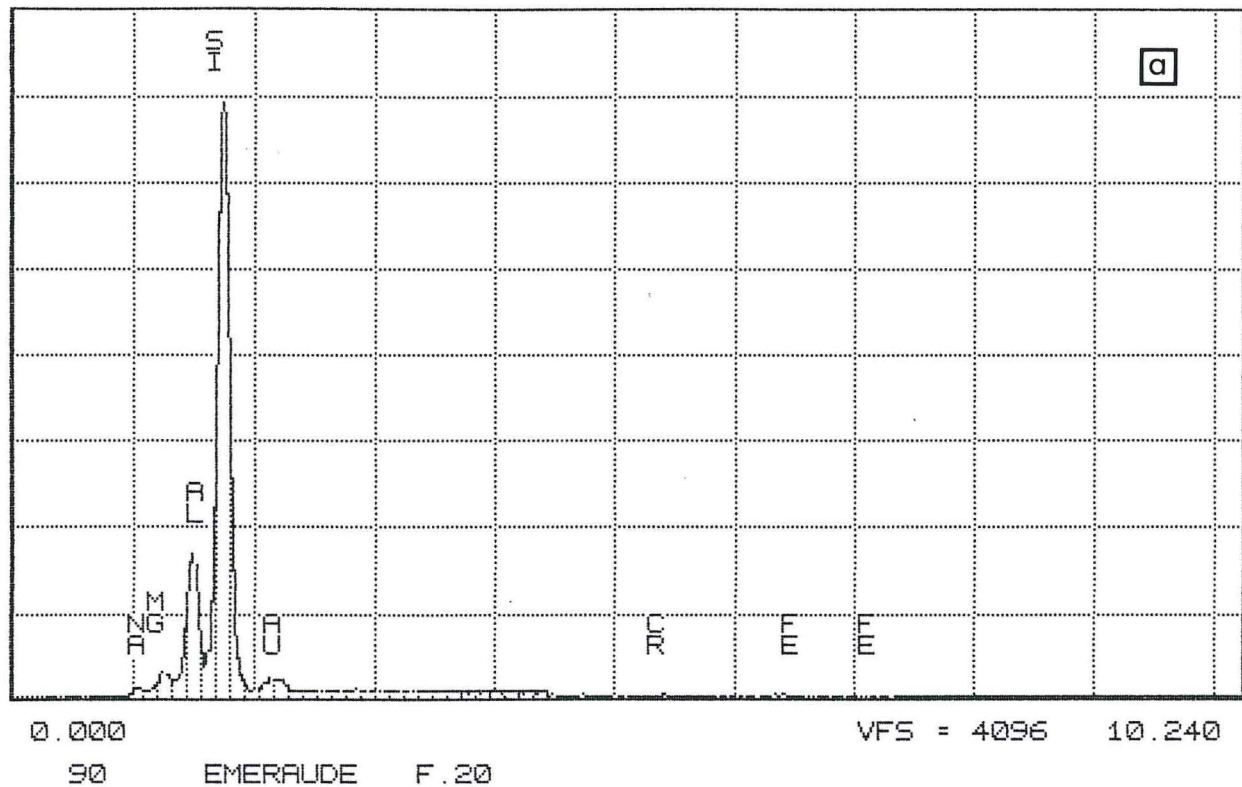
- La présence de Cr
- La prédominance du Fe sur le Cr
- L'absence de V

Les caractéristiques chimiques de l'émeraude de Mananjary sont en accord avec les analyses de SCHWARZ et HENN (1992) sur des minéraux de Morafeno (Mananjary), et comparables à celles des spécimens de Zambie et du Zimbabwe.

On retrouve sur ces échantillons la même inertie à la cathodoluminescence, due à cet enrichissement en Fer.

Si on désigne par Type I, les émeraudes chromifères et ferrifères, et Type II, les béryls vert-jaunâtre contenant du V (in BOSSHART - 1991), les émeraudes de Mananjary sont de Type I.

Cursor: 0.000keV = 0



TN-5500. * S.M.E.B.M.N. * - NANTES -

MAR 16-NOV-93 14:43

Cursor: 0.000keV = 0

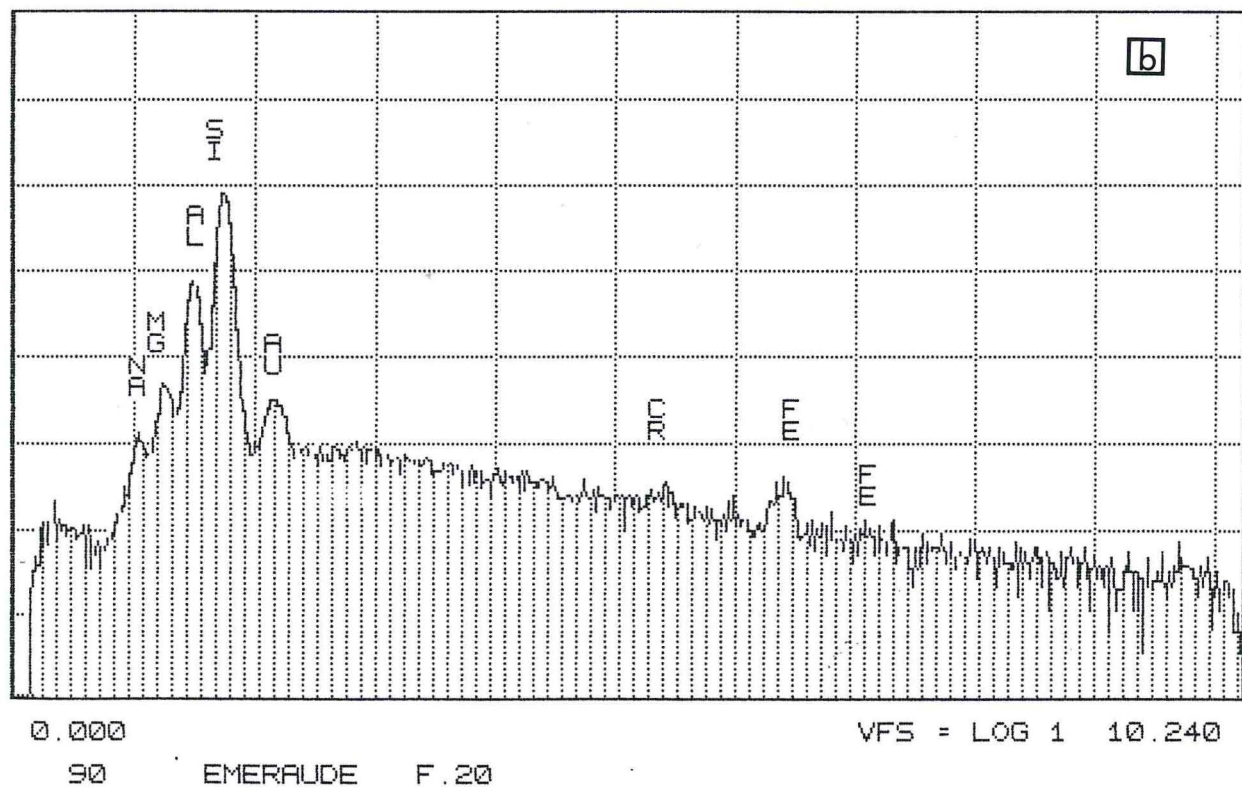


Fig.V : Diagrammes des analyses semi-quantitatives au M.E.B. JEOL 35 C de la faculté des Sciences et Techniques de Nantes.

a : échelle normale

b : échelle logarithmique

Analyste : A. BARREAU

III.2 - Analyses spectrales

III.2.1- Analyse spectrale par réflexion

L'analyse spectrale par réflexion dans le domaine infrarouge sur une face polie de l'émeraude d'Ambodikoly est présentée sur la figure VI. Cette méthode permet une identification rapide de l'espèce minérale. La lecture du spectre, obtenu à l'aide d'un spectromètre FT IR 20 SXC NICOLET, donne les bandes maximales suivantes:

Nombres d'ondes (cm⁻¹)

465
493
546
596
767
819
970
1034
1087

On sait que l'orientation de la pierre modifie les intensités relatives des bandes d'un spectre, mais quel que soit celle-ci, l'allure générale du spectre est conservée; l'allure générale du spectre d'Ambodibakoly correspond bien à celle d'un béryl d'orientation (1010) (in LEUNG et al.-1983).

On remarque quelques bandes appartenant au quartz en 799 et 819 cm⁻¹.

III.2.2 - Analyse spectrale par absorption

Les spectres d'absorption ont été obtenus à l'aide d'un spectrophotomètre CARY 2300 dans le domaine ultraviolet, visible et proche infrarouge (350 à 3000 nm environ). L'analyse a été effectuée sur deux orientations du prisme (1010) et (0001), respectivement perpendiculaire et parallèle à l'axe C.

Les spectres d'absorption dans la région 350 à 800 nm sont présentés sur la figure VII.

Les bandes d'absorption maximales et leur site dans la formule structurale de l'émeraude sont:

<i>Longueurs d'ondes (en nm)</i>	<i>Sites</i>
683	Cr ³⁺ oct.
665	Cr ³⁺ oct.
652	Cr ³⁺ oct.
636	Cr ³⁺ oct.
608	Cr ³⁺ oct.
426	Cr ³⁺ oct.
368	Fe ³⁺ oct.

Les raies d'absorption maximales du Cr³⁺ octaédrique à 426 et 608 nm sont responsables de la couleur de l'émeraude: l'intensité des deux bandes est pratiquement égale, celle de la plus petite raie à 426 nm étant supérieure à celle à 608 nm, la teinte de l'émeraude est vert vif très légèrement jaunâtre.

Ces deux raies 426 et 608 nm sont bien exprimées pour les deux orientations. Par contre, les bandes du Cr à 652 et 665 nm sont absentes pour O.

La deuxième bande principale d'absorption du Cr³⁺ a son maximum à 636 nm et elle se retrouve en O et E.

Pour E, le minimum d'absorption est à 510 nm, et pour O, à 520 nm: le pléochroïsme est vert bleuâtre à bleu pour E et vert jaunâtre pour O.

Les spectres d'absorption dans la région 800 à 2500 nm sont présentés sur la figure VIII. Ils donnent les bandes d'absorption des vibrations des molécules H₂O dans les canaux de la structure cristalline du béryl. Les pics de H₂O sont bien développés pour l'orientation O.

Les raies d'absorption à 818, 843 et 900 nm, correspondent à celles de Fe²⁺ en coordination octaédrique.

Les bandes de vibration maximum de H₂O de l'émeraude dans le domaine 800 à 2500 nm et le type d'eau correspondant sont:

<i>Longueurs d'ondes (en nm)</i>	<i>Type d'eau</i>
1895	II
1789	I
1465	I
1406	II
1400	I
1376	I
1160	II

Les spectres d'absorption des émeraudes, de Mananjary sont tout à fait en accord avec ceux de HÄNNI et KLEIN (1982) sur des émeraudes de Kianjavato, et de SCHWARZ et HENN (1992) sur des minéraux de Morafeno, tous deux provenant de Mananjary.

Le spectre d'absorption dans la région 350 à 900 nm représente un spectre mélangé contenant à la fois un composant émeraude avec les bandes d'absorption du Cr^{3+} et un composant aigue - marine avec les bandes de Fe^{2+} et Fe^{3+} . Ce résultat s'accorde avec l'analyse chimique.

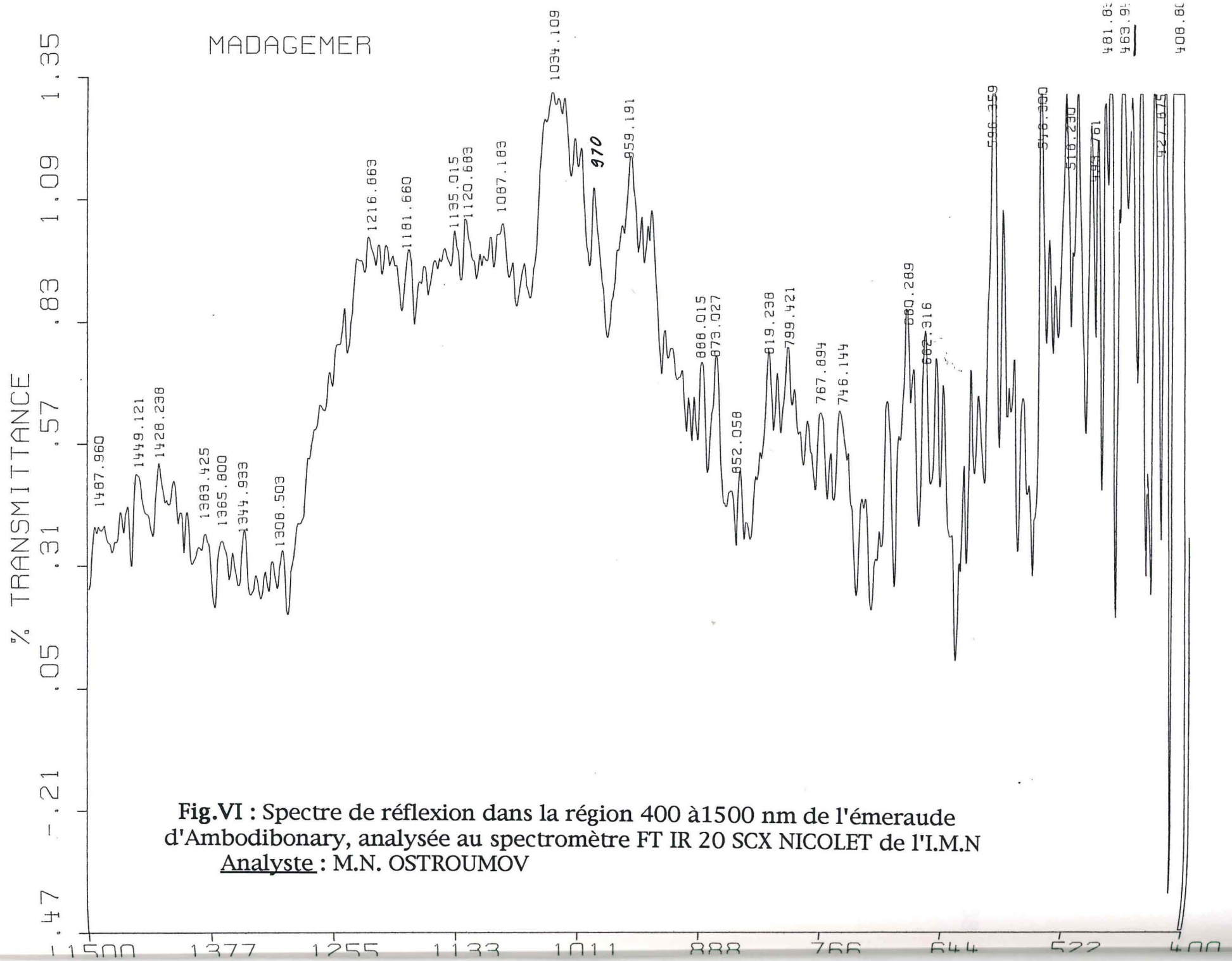
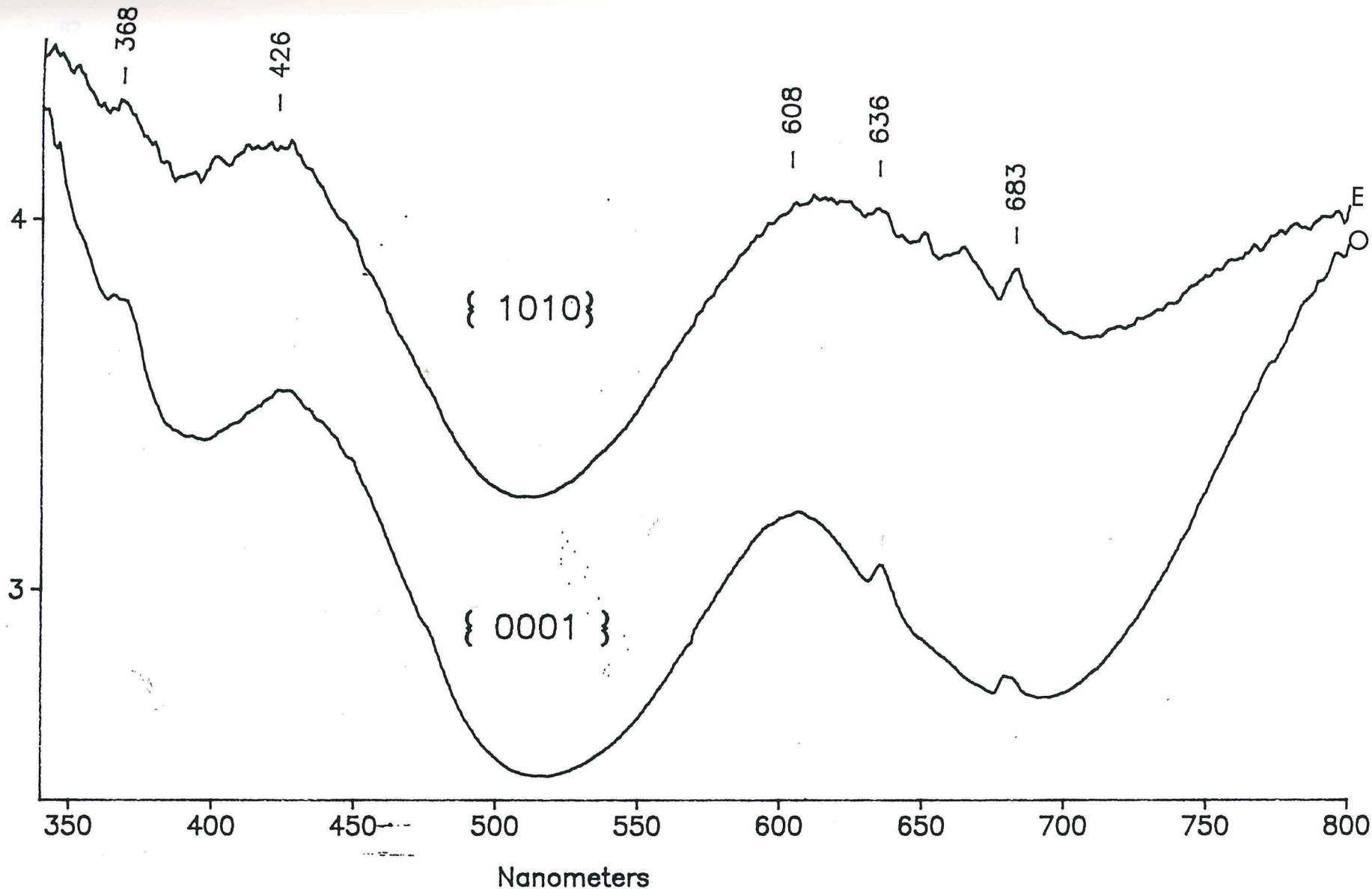


Fig.VI : Spectre de réflexion dans la région 400 à 1500 nm de l'émeraude d'Ambodibonary, analysée au spectromètre FT IR 20 SCX NICOLET de l'I.M.N
Analyste : M.N. OSTROUMOV

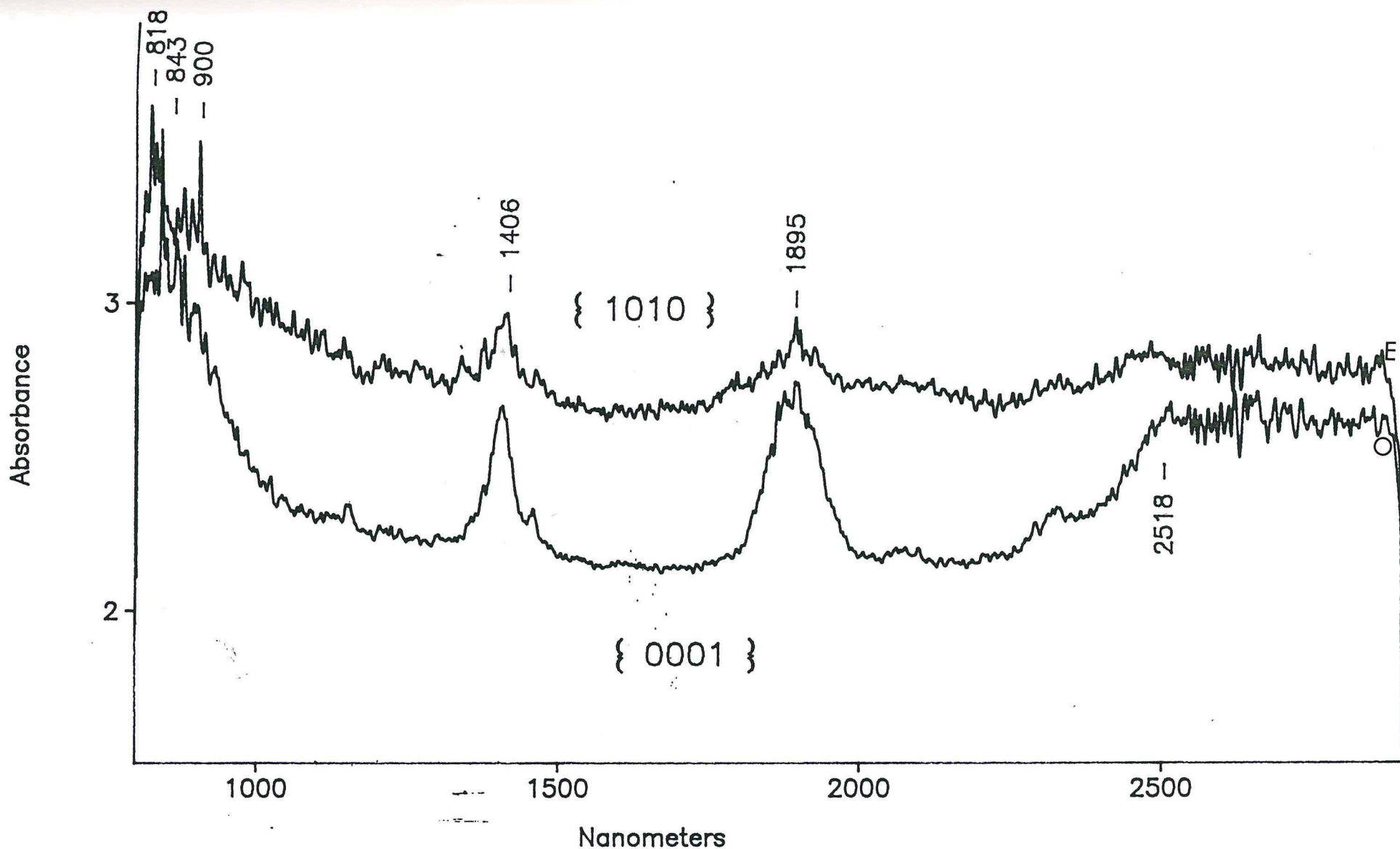
Absorbance



EMERAUD6
Naturelle—prisme

Fig.VII : Spectres d'absorption dans la région 350 à 800 nm de l'émeraude de Mananjary, selon les orientations $\{1010\}$ et $\{0001\}$, analysée au spectrophotomètre CARY 2300 de l'I.M.N.

E : rayon extraordinaire - O : rayon ordinaire
Analyste : M.N. OSTROUMOV



EMERAUD4
Naturelle

Fig.VIII : Spectres d'absorption dans la région 1000 à 2500 nm de l'émeraude de Mananjary, selon les orientations (1010) et (0001), analysée au spectrophotomètre CARY 2300 de l'I.M.N.

E : rayon extraordinaire - O : rayon ordinaire

Analyste : M.N. OSTROUMOV

III.3 - Etude des inclusions

Les inclusions ont été observées sur des sections polies sur les deux faces, de 1 mm environ d'épaisseur, sciées perpendiculairement à l'axe C des cristaux. Chaque section a été étudiée au microscope polarisant et les plus riches en inclusions ont été analysées au M.E.B.

En premier lieu, il faut remarquer une zonation de la coloration de l'émeraude: vert clair vers le centre à vert foncé vers la bordure, ou une inhomogénéité de la transparence: nuageuse vers le centre à plus transparente vers la bordure. Ces variations sont dues à la plus ou moins grande densité des inclusions, aux types d'inclusions fluides et aux fissures.

III.3.1 - Les inclusions solides

Les travaux antérieurs sur les émeraudes de Mananjary indiquent les inclusions suivantes:

- Biotite brune, muscovite, apatite, hématite, goethite, quartz, ilménite, et tourmaline (in HÄNNI et KLEIN - 1982).

- Mica, trémolite/actinote et autres minéraux décrits mais non déterminés (in SCHWARZ et HENN - 1992).

- Mica et goethite en remplissage de fractures, probablement apatite ou tourmaline (KLEYENSTUBER - 1991).

En annexes IV et V, nous présentons, respectivement, les diagrammes des analyses et les photographies des inclusions solides prises au M.E.B. et/ou au microscope polarisant.

Nous avons pu mettre en évidence les inclusions suivantes:

- La phlogopite: c'est de loin le minéral le plus représentatif dans les émeraudes de Mananjary. On y retrouve les deux générations:

- les plus abondantes, syngénétiques, forment des plaques ou des empilements hexagonaux ou pseudo-hexagonaux, bruns foncés ou bruns clairs, disposés parallèlement à la section basale de l'émeraude.

- Les cristaux protogénétiques ont une allure sphérique à ovale, une couleur brun verdâtre et sont le plus souvent en bordure du minéral.

Des lamelles de phlogopite, montrant les clivages parallèles, sont localisées en bordure. Le mica syngénétique remplit aussi les canaux de croissance.

Nous remarquons la présence de baguettes bruns verdâtres à vert brunâtres, semblables aux "bambous" de trémolite/actinote décrits par SCHWARZ et HENN (1992), mais qui se sont révélées être des phlogopites à l'analyse.

La phlogopite contient un peu de Ti et Cr.

- Le plagioclase.
- La calcite.
- Le quartz.

Le plagioclase, quartz et calcite sont localisés vers le centre du minéral hôte.

- La barytine.
- La pyrite.
- La goethite ou hématite; ce minéral remplit les fractures.

Dans l'annexe V, nous présentons une inclusion particulière, montrant une disposition en zones bien individualisées avec du centre vers la bordure: pyrite, goethite ou hématite et barytine. On remarque une réaction à la cathodoluminescence sur la périphérie.

- L'allanite: l'analyse montre parfois la présence de trace de Pb.
- X1: d'après la composition chimique, le minéral qui s'en rapproche le plus serait la hellandite de formule $(Ca,Y)_6 (Al,Fe^{3+}) Si_4 B_4 O_{20} (OH)_4$.
- X2: Ce minéral uranifère et contenant du Pb et Y, pourtant bien individualisé, n'a pu être identifié sur la base des analyses disponibles.

III.3.2 - Les inclusions fluides

Les émeraudes contiennent une très grande variété d'inclusions fluides, tant au point de vue de la forme des cavités que de la nature de leur remplissage et de leur taille. Il est certain que nous ne pourrions pas les décrire toutes dans ce mémoires.

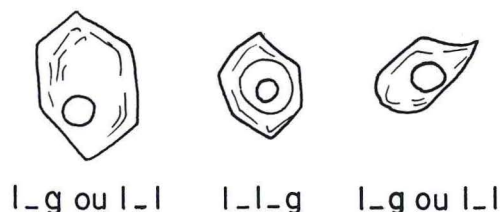
En annexe VI, nous donnons quelques photographies d'inclusions fluides.

Les différentes combinaisons de remplissage sont:

- Une phase "l" ou "g"
- Deux phases "l-l", "l-g" ou "l-s"
- Trois phases "l-l-g" ou "l-g-s"
- Trois phases à quatre composants "l-l-g-s"
- Trois phases à multicomposants, notamment solides.

Les principales formes sont:

- Les cristaux négatifs à contour hexagonal ou pseudo-hexagonal, plus ou moins émoussé ou informe (I).



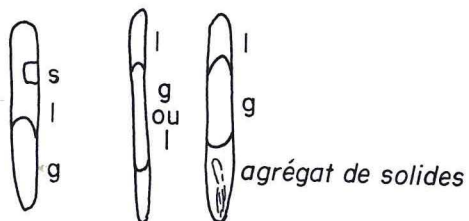
- Les inclusions plates à contour géométrique net (II).



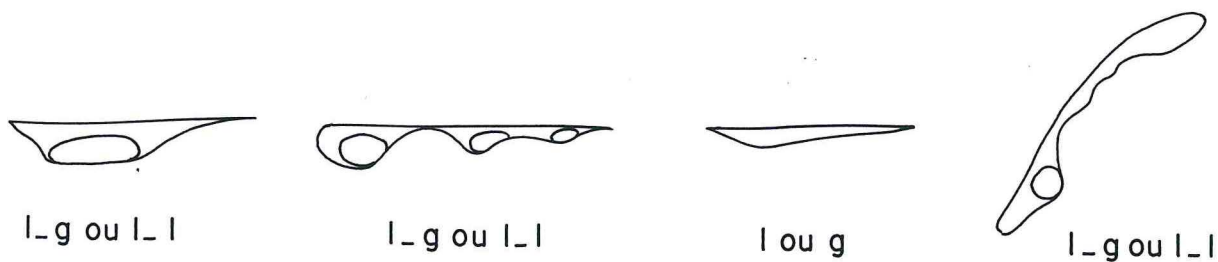
- Les cristaux négatifs de forme variée, comme les inclusions plates, mais à contour plus émoussé (III).



- Les inclusions tubulaires allongées (IV).



- Les inclusions de formes quelconques mais étirées (V).



Les inclusions fluides présentent les caractères suivants:

- Les remplissages à trois phases "l-l-g" et "l-l-s" sont rares, bien qu'ils se retrouvent dans tous les types d'inclusions.

- Les inclusions I et II sont primaires. Les types I sont plus grosses, isolés ou par groupe ne dépassant pas cinq unités; ils se placent entre les cassures ou en bordure du minéral.

Les inclusions II sont plus petites et plus abondantes, réparties principalement à la périphérie; la bulle de gaz est plus petite et mobile.

- Les inclusions III et IV sont primaires ou pseudosecondaires. Elles forment des alignements parallèles ou ont une répartition quelconque.

- Les inclusions V sont secondaires. Elles montrent un arrangement courbe et parallèle en bordure, formant des "trainées" irradiant des cassures.

- Un autre type de groupement est constitué d'inclusions minuscules de forme quelconque, presque opaques, groupées autour des cassures formant comme un "voile".

Ainsi, contrairement à ce qui a été observé par les auteurs précédents (inclusions fluides peu abondantes et peu variées), les émeraudes de Mananjary contiennent une grande variété d'inclusions fluides et elles peuvent servir de critères caractéristiques du gisement.

Outre ces inclusions, on peut aussi observer d'autres figures intéressantes comme:

- Les canaux de croissance dans l'axe C, remplis de phlogopite mais parfois aussi de fluide, toujours irradiés de fissures; ils montrent quelques fois un arrangement circulaire et les fissures se relient entre elles.

- Les cavités très plates, parfois à remplissage opaque, desquelles partent des inclusions en dendrites.

- Les givres de guérison remplis de minéraux opaques.

IV - C O N C L U S I O N

Quel est le "guide" de la minéralisation d'émeraude de Mananjary ?

Le deux meilleurs guides de la minéralisation sont:

- Les schistes à phlogopites.
- L'ensemble "pegmatite - schiste à phlogopites - gneiss".

La minéralisation est à chercher dans les schistes à phlogopites les plus proches du contact de la pegmatite.

La figures IX (Annexe I) d'un gisement de la Société, montre bien cette association étroite "pegmatite-schiste-gneiss". Cette figure peut également expliquer que la pegmatite est la source de Be, celle du Cr étant les roches basiques et ultrabasiques de la Série encaissante, contribuant à la formation de l'émeraude.

Comme guides minéralogiques, facilement identifiables, mise à part la phlogopite, on cite la calcite, et l'amphibole (ferroactinote ou trémolite) .

Cependant, pour parfaire cette hypothèse, il faudrait étudier la composition minéralogique des schistes non minéralisés (Fig.III). Il serait aussi intéressant d'étudier l'environnement géologique (structure, minéralogie et géochimie des pegmatites et gneiss, etc...) afin de cerner les conditions favorables à la minéralisation.

Quels sont les critères d'identification de l'émeraude de Mananjary ?

Outre la composition chimique et les spectres d'absorption caractérisés par la présence de Fe et sa prédominance sur le Cr, les inclusions constituent des critères de valeur pour l'identification de l'origine de l'émeraude, aussi avons-nous essayé de les décrire avec précision.

Parmi les inclusions typiques, nous pouvons citer:

- Les minéraux à Terres Rares et uranifères; mais aussi la calcite, la phlogopite et la barytine. L'allanite est connue dans les émeraudes du Brésil, la calcite à Sòcòtò, Bahia au Brésil; la phlogopite est observée dans les minéraux de l'Oural, dans les autres gisements , on cite la biotite.

- Les canaux de croissance dans l'axe C, abondants et irradiés de fissures.

- Les inclusions fluides, très nombreuses et variées, les plus caractéristiques étant les types II (plats et à contour géométrique net).

Un autre moyen de détermination de l'origine géographique des émeraudes est leur datation par la méthode Rb/Sr, mis au point par VIDAL et al. (1992).

Des essais de datation sur des émeraudes de Madagascar ont donné des âges de 497 à 618 M.A.: les émeraudes malgaches sont caractéristiques de bouclier Précambrien. Il est à noter que ces âges correspondent à l'Orogénie Panafricaine (550 M.A.), qui a affecté et repris les formations Précambriennes plus anciennes et à laquelle sont liés les nombreux champs pegmatitiques de Madagascar.

Dans ce mémoire, nous avons essayé d'étudier l'émeraude de Mananjary avec sa gangue, dans son environnement géologique, à partir d'échantillons précis, sans ambiguïté d'origine. Nous avons conscience que cette étude est incomplète, suscite plus de questions qu'elle ne résout de problèmes et surtout ouvre la porte à d'autres sujets d'étude.

ANNEXE I : explications des figures II, III et IX

Fig. II : Plan de la carrière d'Ambodibonary (A2)

Il s'agit de 3 lentilles (A21- A22- A23), à pendage général 40° EW, encaissées dans des gneiss et quartzites. Les lentilles sont distantes de 10m environ. L'échantillon de la roche encaissante a été prélevé au front de la galerie.

Fig. III : Schéma de la carrière d'Ambodibakoly (B1)

Les échantillons, B11- B12- B13 -B14 , ont été prélevés dans 2 lentilles minéralisées à pendage subvertical, de 40 à 50 cm d'épaisseur maximum; on remarque une lentille de schiste à biotite, très altéré, non minéralisé.

L'encaissant est gneissique, mais on relève la présence d'un filon de quartzite à grains fins. La hauteur de commandement de l'exploitation est de 30 m environ.

Fig. IX : Schéma d'un type de gisement d'émeraude de Mananjary.

Les schistes à émeraude se trouvent au contact pegmatite-gneiss. On voit l'absence de schistes minéralisés dans les formations non gneissiques, pourtant au contact de la pegmatite.

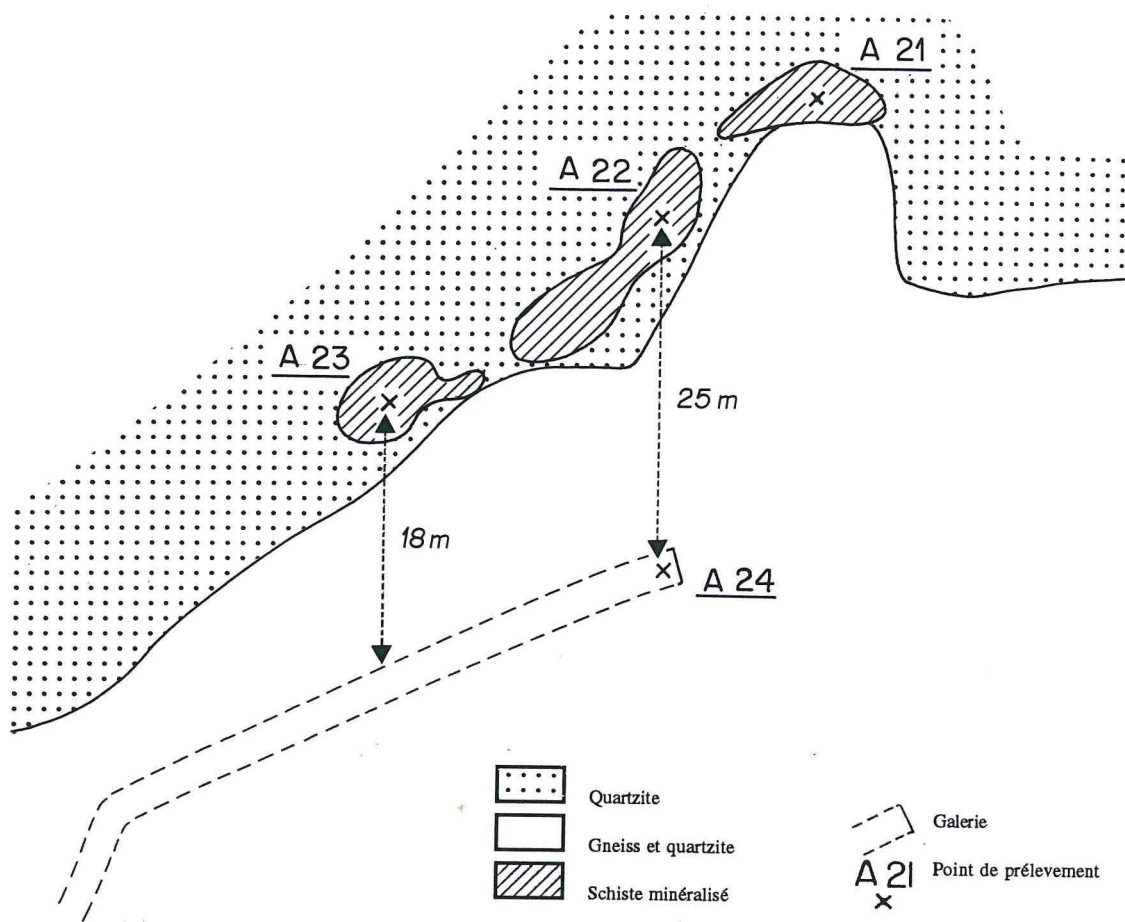


Fig.II : Plan de la carrière d'Ambodibonary (A2)
 (Tiré des archives de la Société)

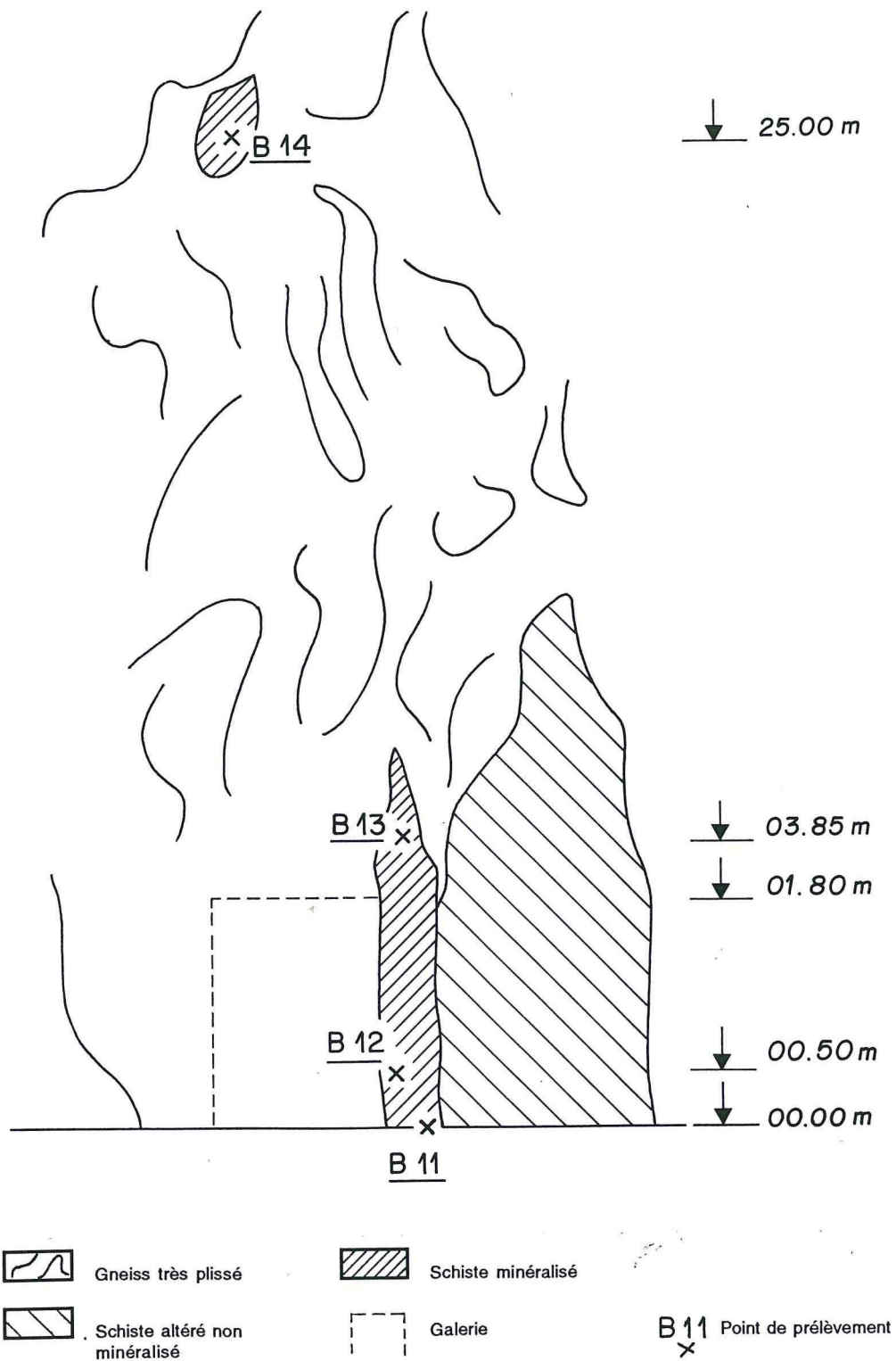
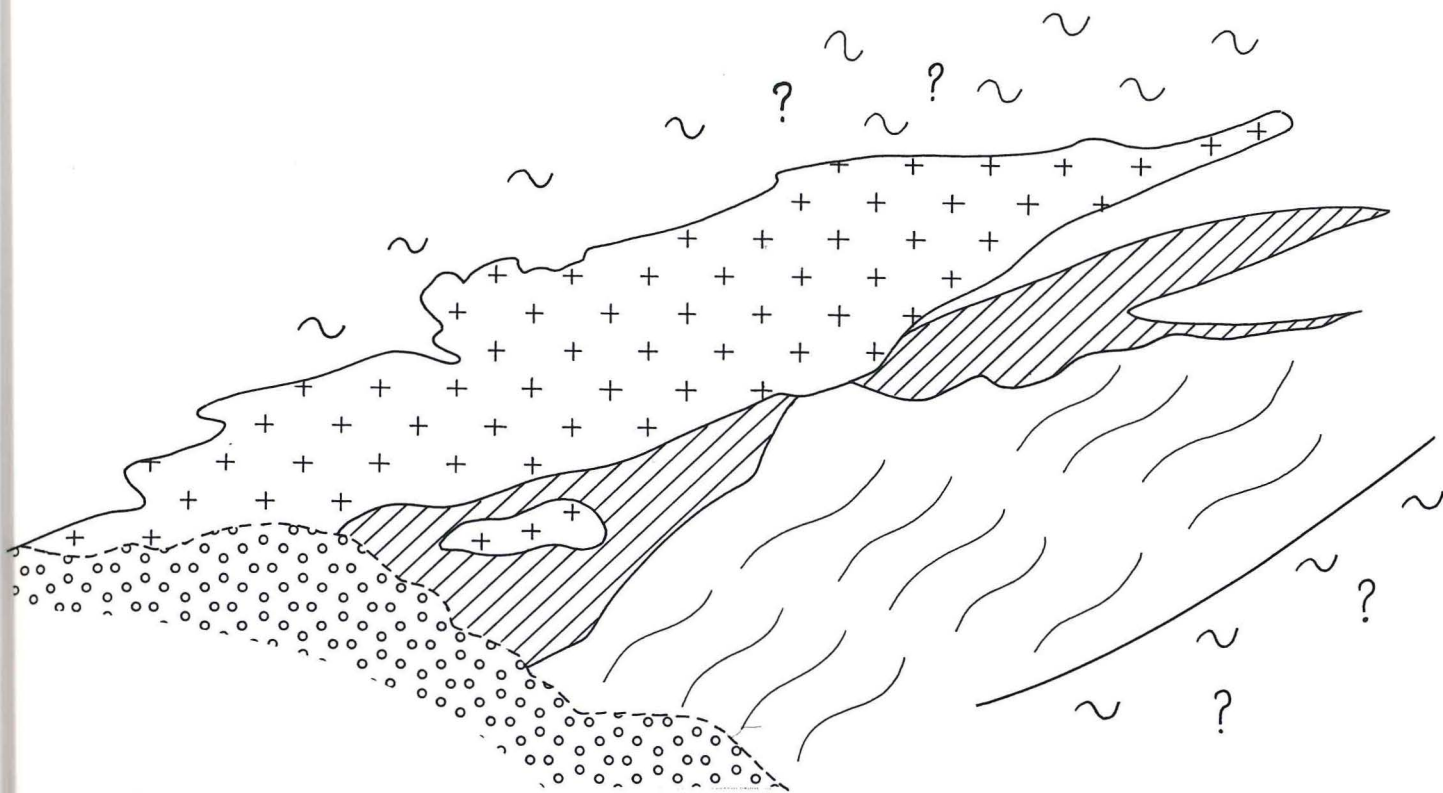


Fig.III : Schéma de la carrière d'ambodibakoly (B1)
 (Vue de face du front de taille)
 (Tiré des archives de la Société)



- | | | | |
|---------|--------------------|---------|---|
| + + | Pegmatite | ~ ? | ? |
| / / / / | Schiste à émeraude | o o o o | Déblais d'exploitation
et couverture latéritique |
| ~ ~ ~ | Gneiss | | |

Fig.IX : Schéma d'un type de gisement d'émeraude de Mananjary dessiné à partir d'une photographie prise par D. PIAT en 1990.

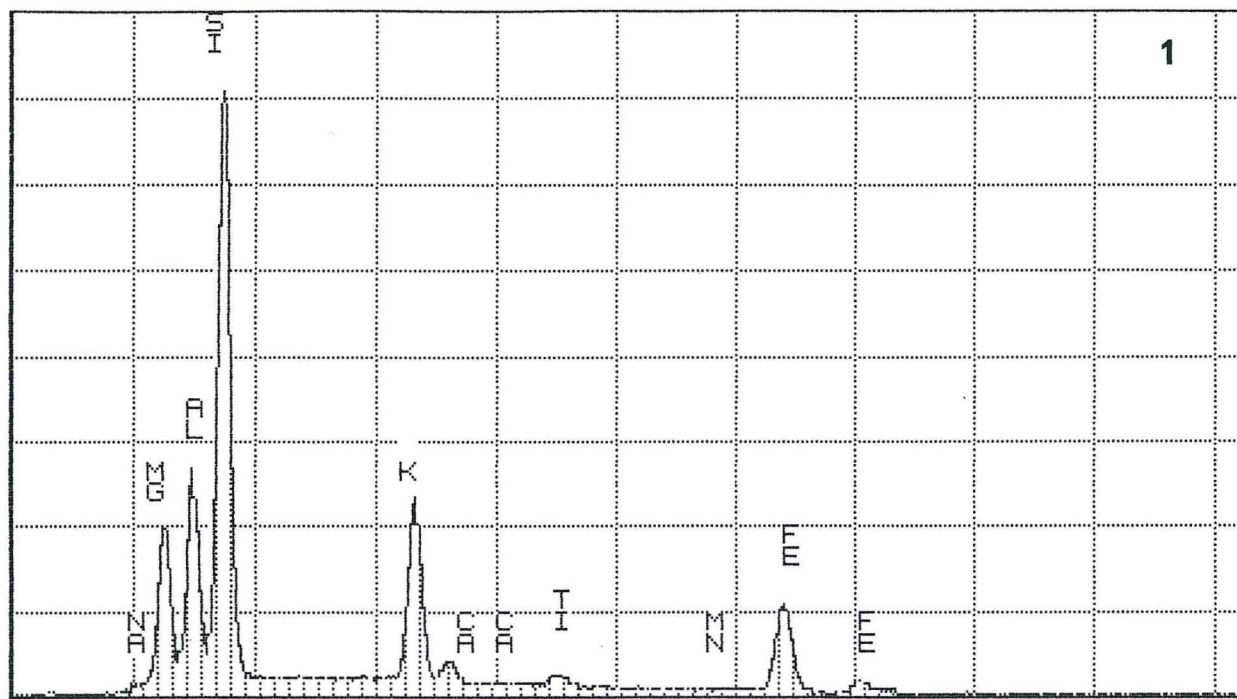
ANNEXE II : Analyses des minéraux constituant les gneiss et les schistes

Diagrammes des analyses semi-quantitatives au microscope électronique à balayage JEOL 35 C de la Faculté des Sciences et Techniques de Nantes.

Analyste : A BARREAU.

Listes des minéraux :

- 1) F13 : Phlogopite/ biotite (brune) dans les gneiss encaissants.
- 2) F16 : Phlogopite/ biotite (brune) dans les schistes d'Ambodibonary.
- 3) F19 : Phlogopite/ biotite (verte) dans les schistes d'Ambodibakoly et les gneiss.
- 4) F14 : Trémolite/ferroactinote (vert-bleuâtre) dans les schistes d'Ambodibakoly.
- 5) F15 : Ferroactinote/trémolite (verte) dans les schistes d'Ambodibonary.
- 6) F17 : Calcite dans les schistes d'Ambodibakoly.
- 7) F10 : Calcite dans les schistes d'Ambodibonary (diagramme en échelle logarithmique).

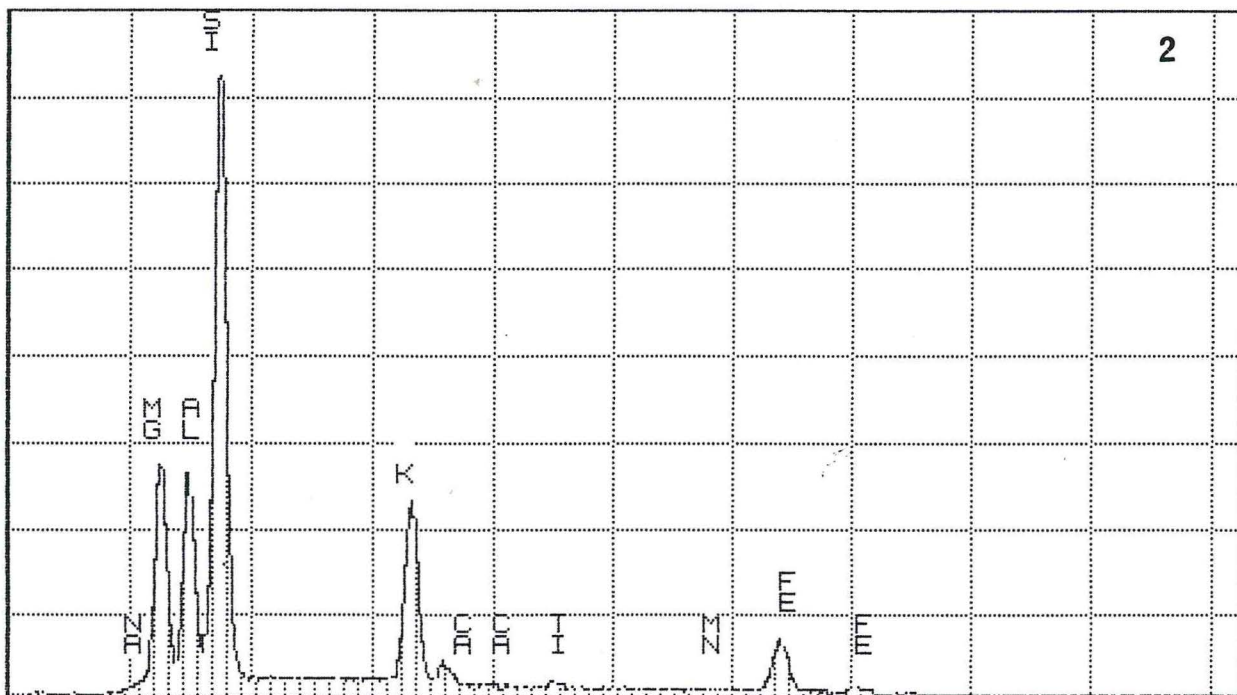


0.000

VFS = 2048 10.240

57 LAME A 23 a F.13

Phlogopite/biotite dans les gneiss



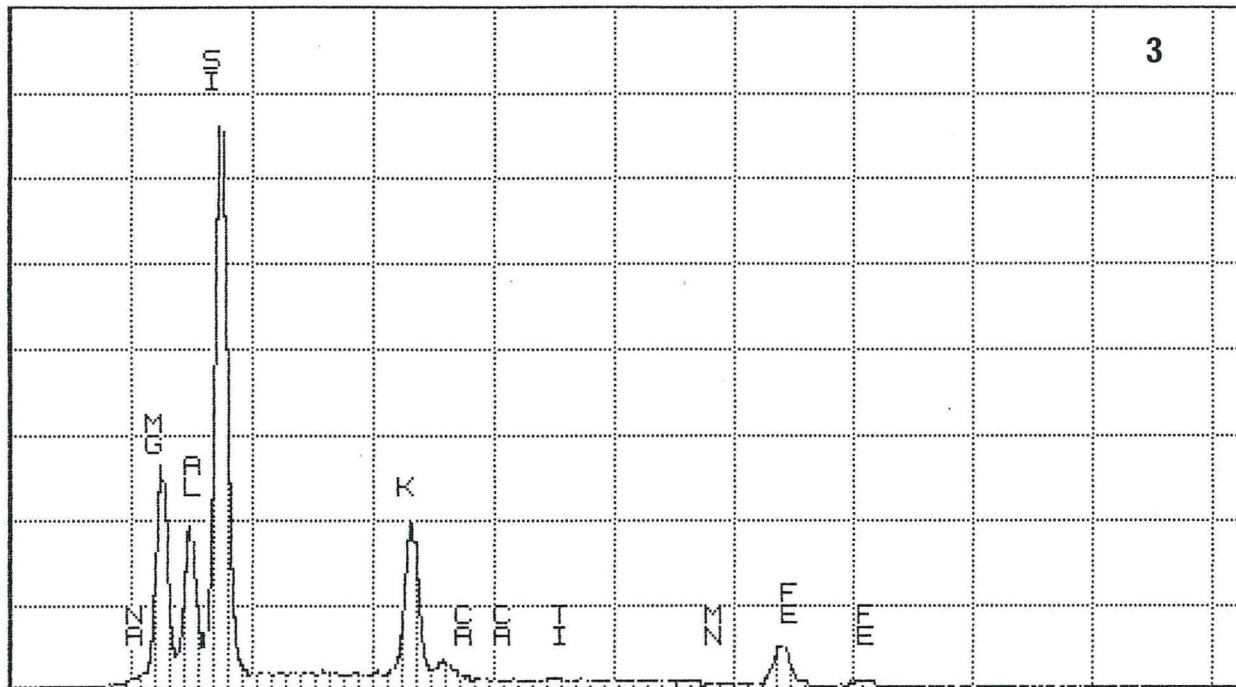
0.000

VFS = 2048 10.240

67 LAME A 24 F.16

Phlogopite/biotite d'Ambodibonary

Cursor: 0.000keV = 0



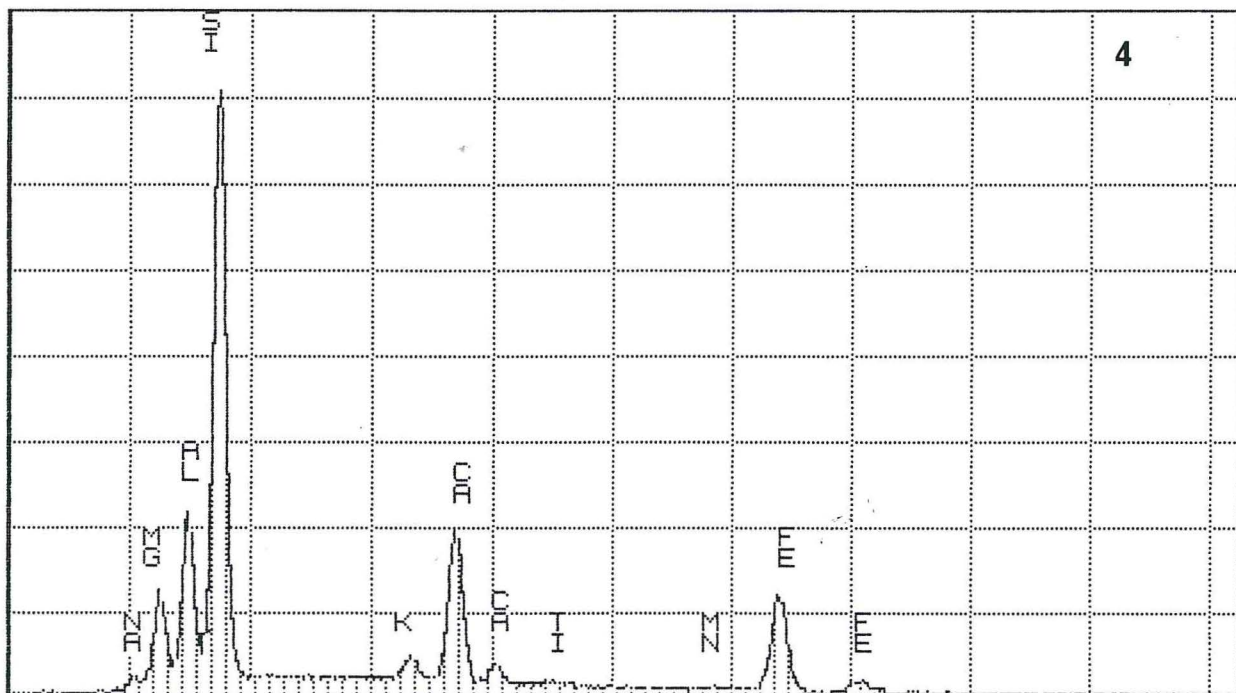
0.000

VFS = 4096 10.240

93 LAME B 13 F.19

Phlogopite/biotite d'Ambodibakoly

Cursor: 0.000keV = 0



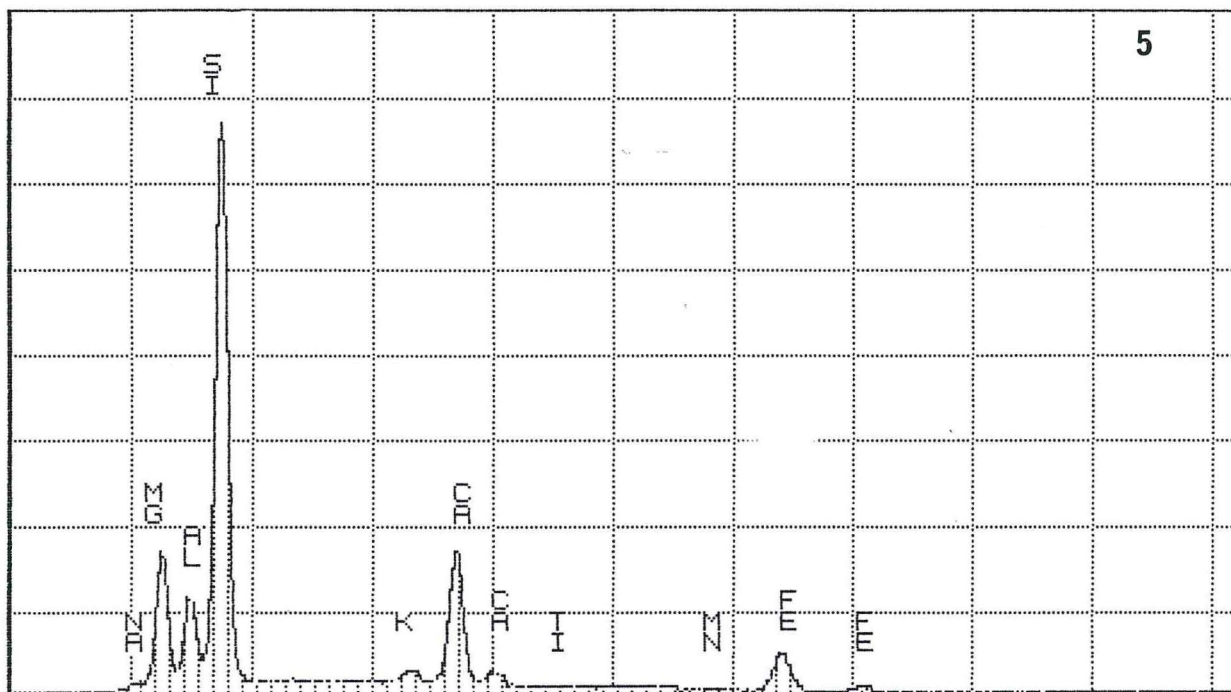
0.000

VFS = 2048 10.240

48 LAME A 23 a F.14

Trémolite/ferroactinote (vert-bleuâtre) dans les gneiss et les schistes d'ambodibakoly

Cursor: 0.000keV = 0

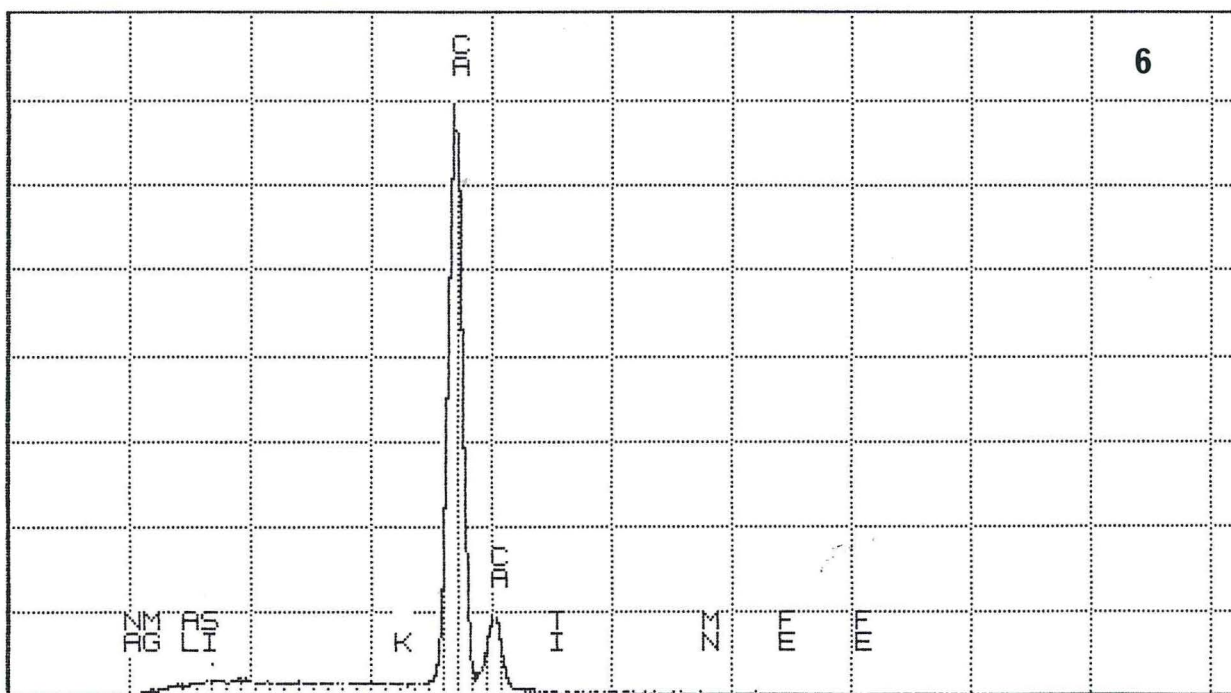


0.000 VFS = 4096 10.240

106 LAME A 24 F.15

Ferroactinote/trémolite (verte) dans les schistes d'ambodibonary

Cursor: 0.000keV = 0

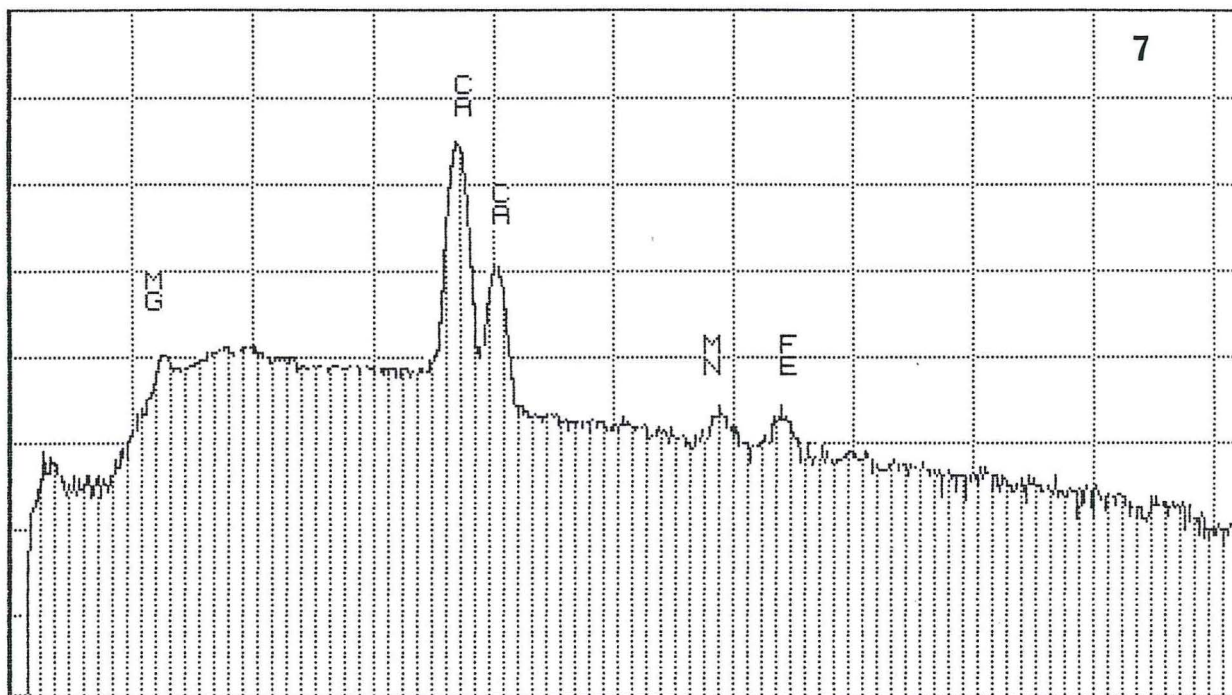


0.000 VFS = 4096 10.240

40 LAME B 12 F.17

Calcite d'Ambodibakoly

Cursor: 0.000keV = 0



0.000

VFS = LOG 1 10.240

292

LAME A 21 a F.10

Calcite d'ambodibonary

ANNEXE III : Photographies des associations minérales dans les gneiss et les schistes à phlogopite.

Légende des minéraux :

Av : Ferroactinote/trémolite (amphibole verte).

Ab : Trémolite/ferroactinote (amphibole vert-bleuâtre).

B : Biotite.

Ph : Phlogopite.

Pl-Q : Plagioclase-quartz.

E : Epidote.

C : Calcite.

Cl : Chlorite.

O : Minéraux opaques (ilménite et/ou pyrite).

a - Gneiss encaissant (LN-X10)

On voit les deux variétés d'amphiboles, ferroactinote (verte) et trémolite (vert-bleuâtre), la biotite, des minéraux opaques, dans une matrice de plagioclase et quartz.

b - Schiste d'Ambodibonary (LN-X25)

On a une plage de calcite contenant de la phlogopite et chlorite. on remarque une interpénétration de muscovite et phlogopite.

c - Schiste d'Ambodibonary (LN-X10)

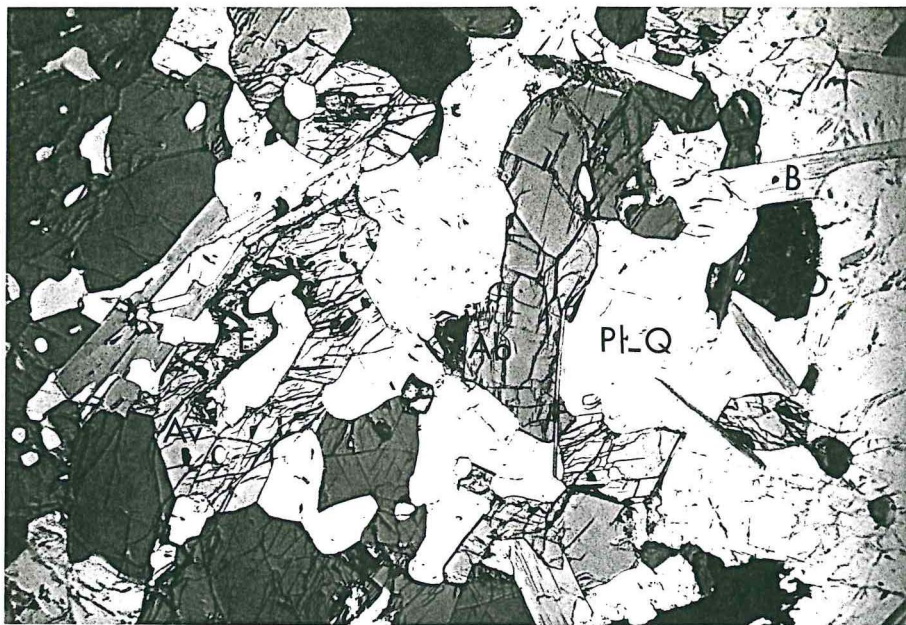
Des lattes de phlogopite, parfois déferitisées, montrent des auréoles pléochroïques provoquées par les minéraux métamictes. Les amphiboles, plagioclase et quartz se trouvent entre les lattes.

d - Ferroactinote d'Ambodibonary (LN-x10)

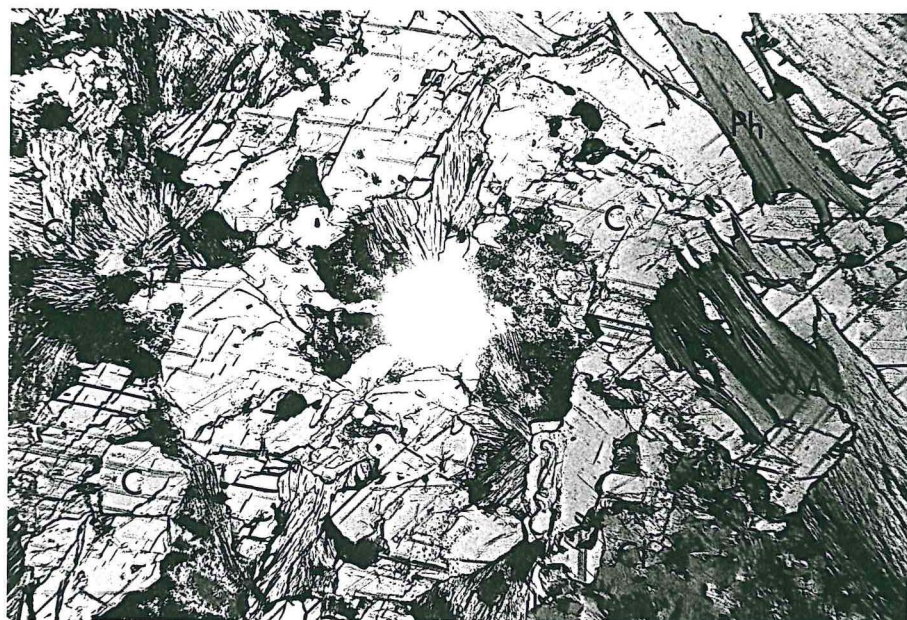
L'amphibole est truffée d'inclusions de chlorite, phlogopite et calcite, surtout le long des cassures.

e - Schiste d'Ambodibakoly (LN-x10)

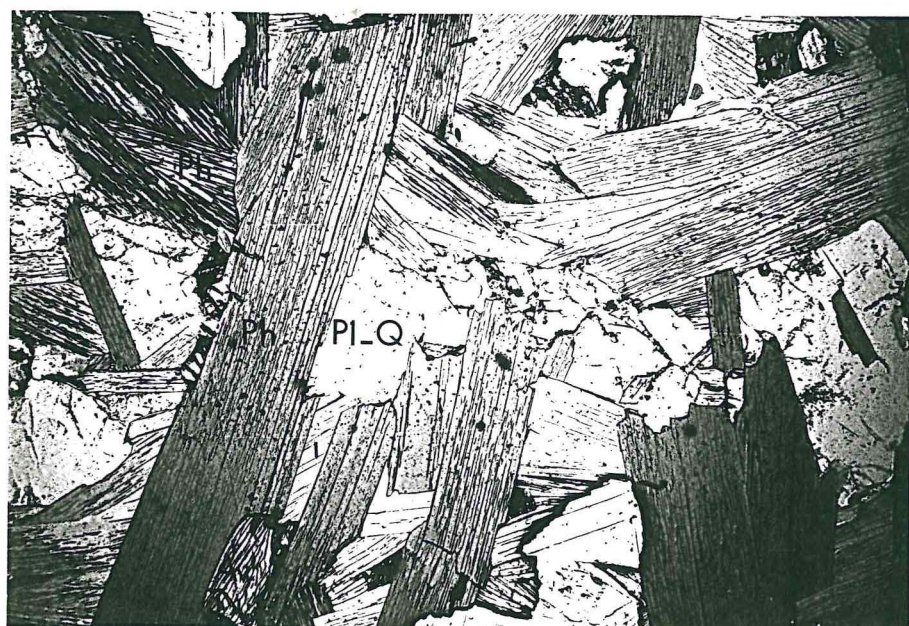
Les carbonates et le quartz forment des plages intersticielles étirées entre les lattes de phlogopites. On note toujours la présence d'auréoles pléochroïques.



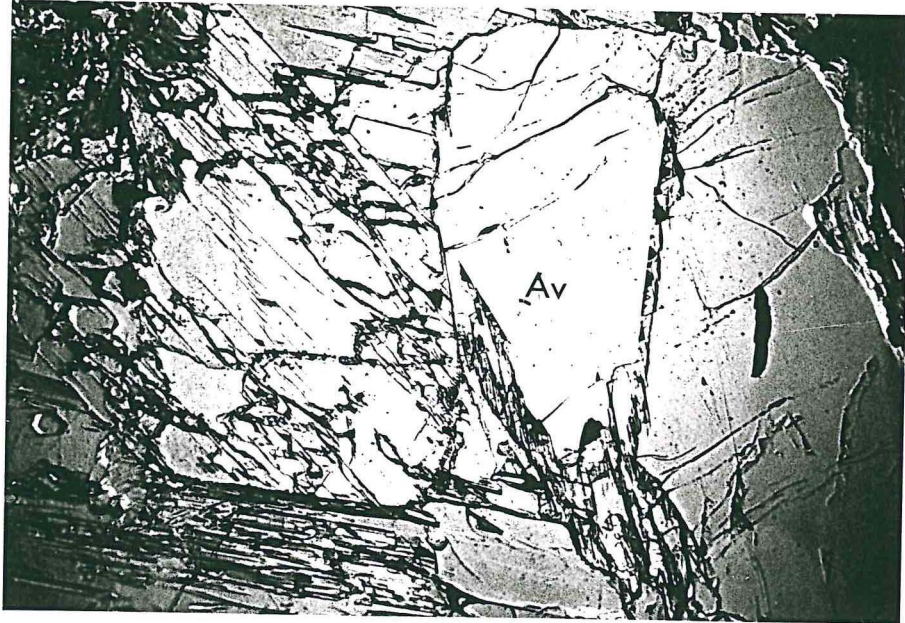
a



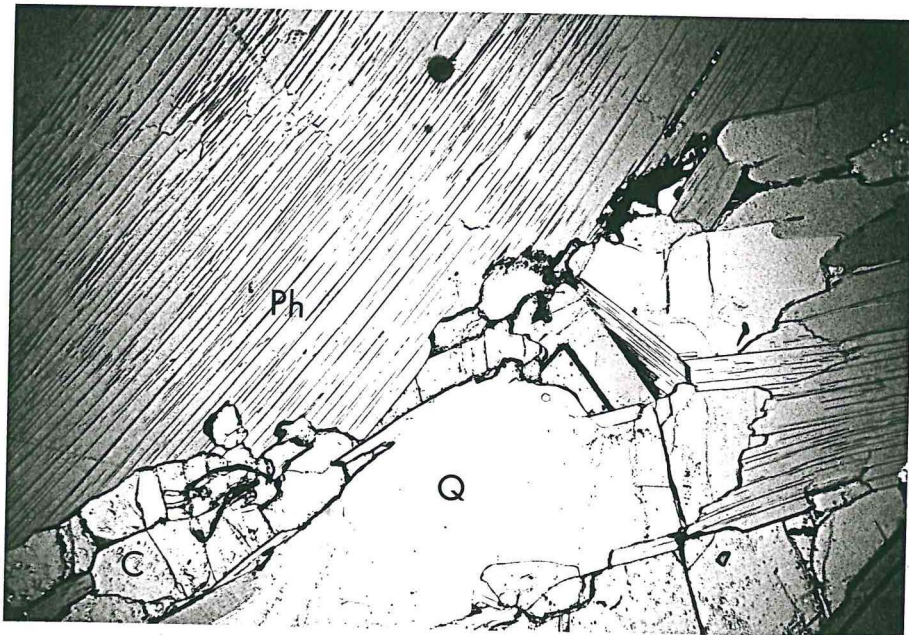
b



c



d



e

ANNEXE IV : Analyses des inclusions solides dans l'émeraude de Mananjary.

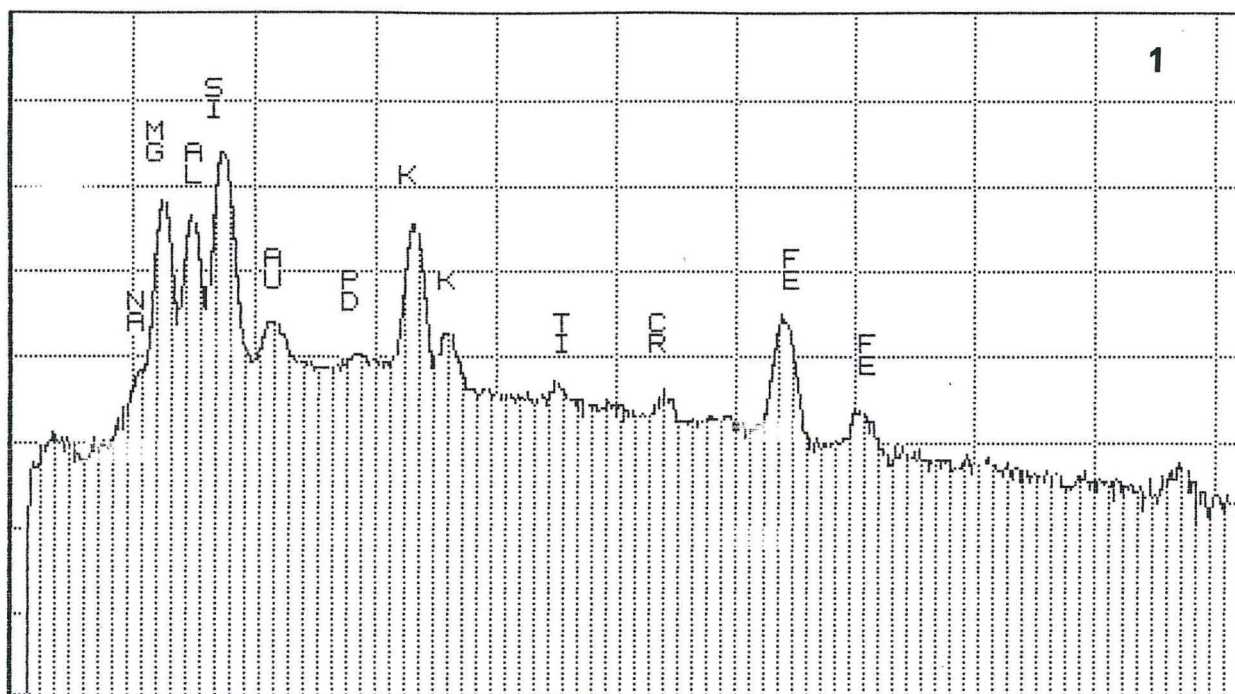
Diagrammes des analyses semi- quantitatives au microscope électronique à balayage JEOL 35 C de la Faculté des Sciences et Techniques de Nantes.

Analyste : A. BARREAU.

Liste des minéraux :

- 1) F21 : Phlogopite
- 2) F26 : Barytine
- 3) F23 : Allanite
- 4) F24 : Allanite contenant des traces de Pb
- 5) F22 : X1 (hellandite?)
- 6) F22 : X1 (diagramme en échelle logarithmique)
- 7) F25 : X2
- 8) F25 : X2 (diagramme en échelle logarithmique)

Cursor: 0.000keV = 0

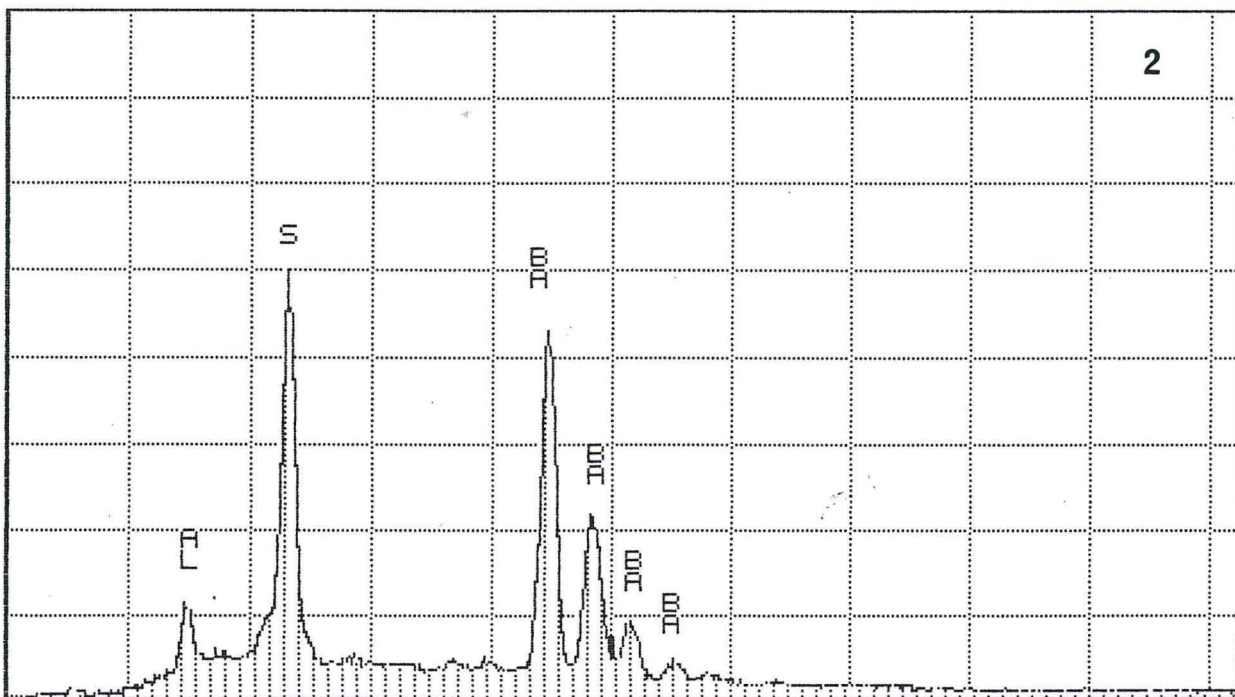


0.000

VFS = LOG 1 10.240

336 EMERAUDE INC. F.21 Phlogopite

Cursor: 0.000keV = 0

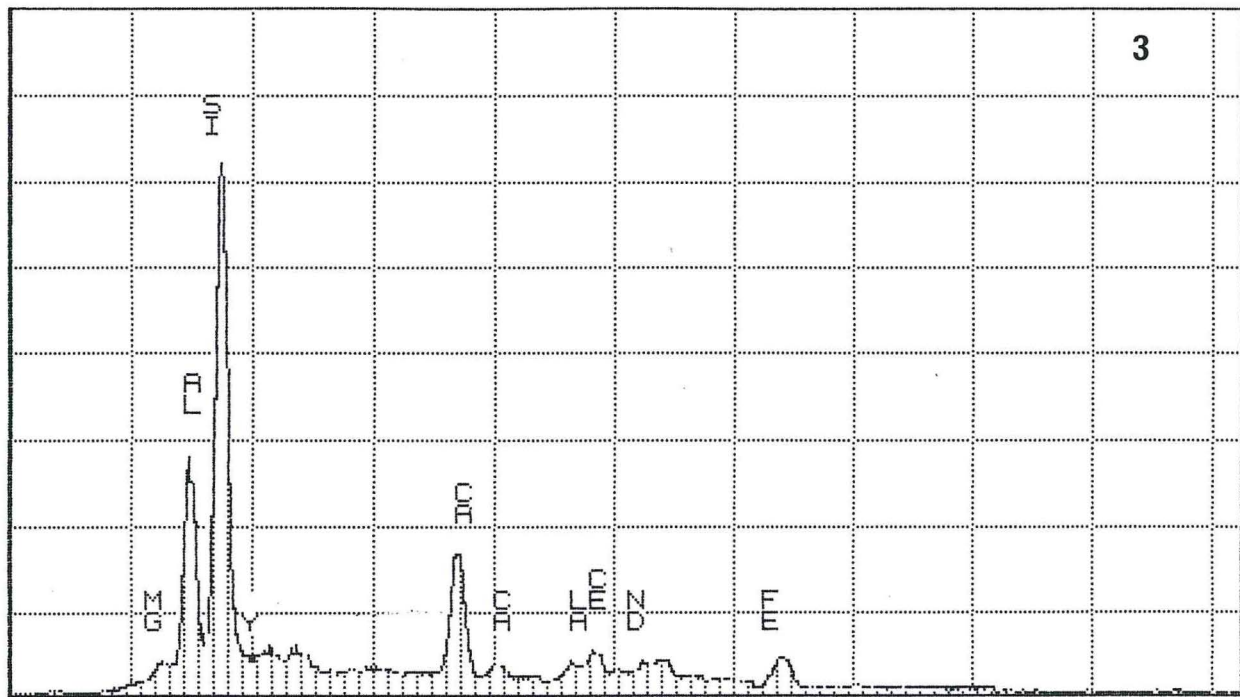


0.000

VFS = 2048 10.240

83 EMERAUDE INC. F.26 Barytine

Cursor: 0.000keV = 0



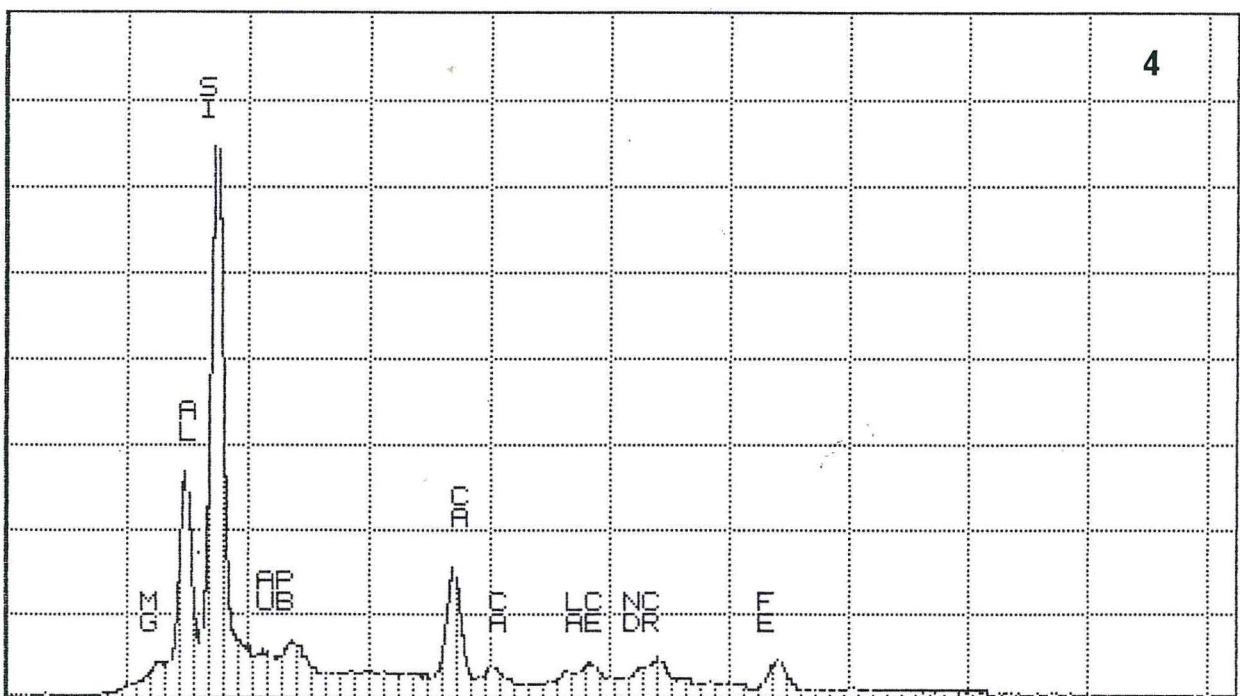
0.000

VFS = 4096

10.240

133 EMERAUDE INC. F.23 Allanite

Cursor: 0.000keV = 0

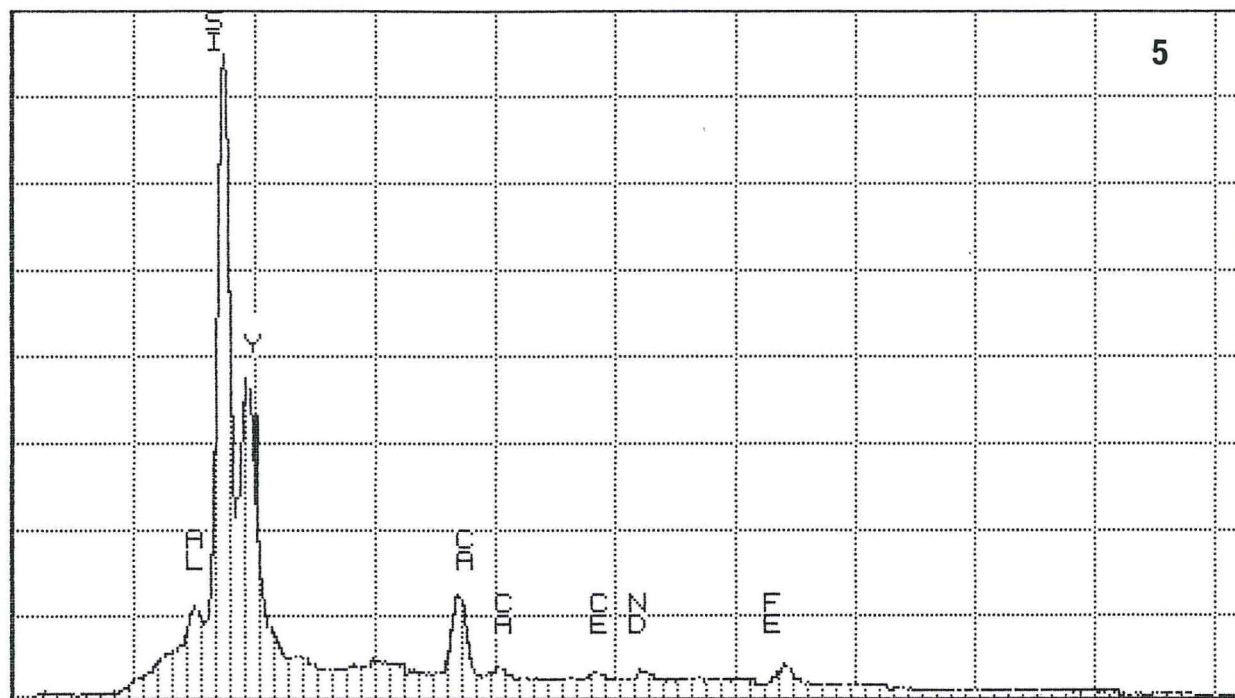


0.000

VFS = 8192

10.240

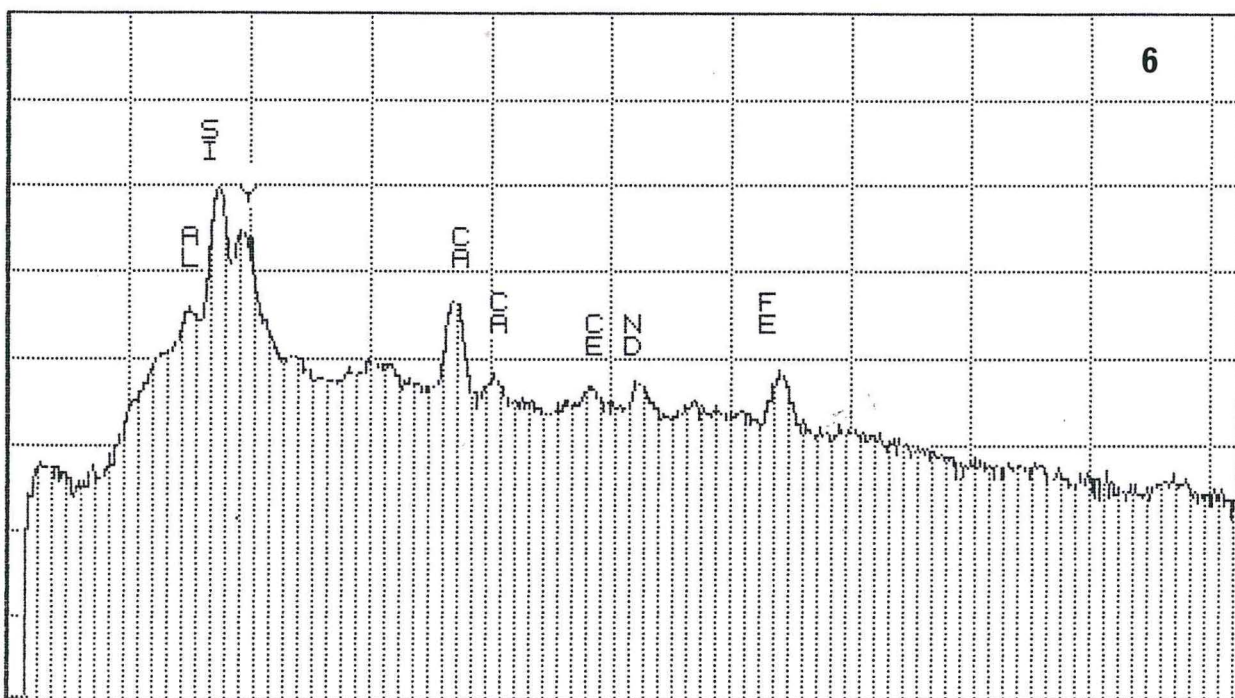
261 EMERAUDE INC. F.24 Allanite



0.000 VFS = 4096 10.240

170 EMERALDE INC. F.22

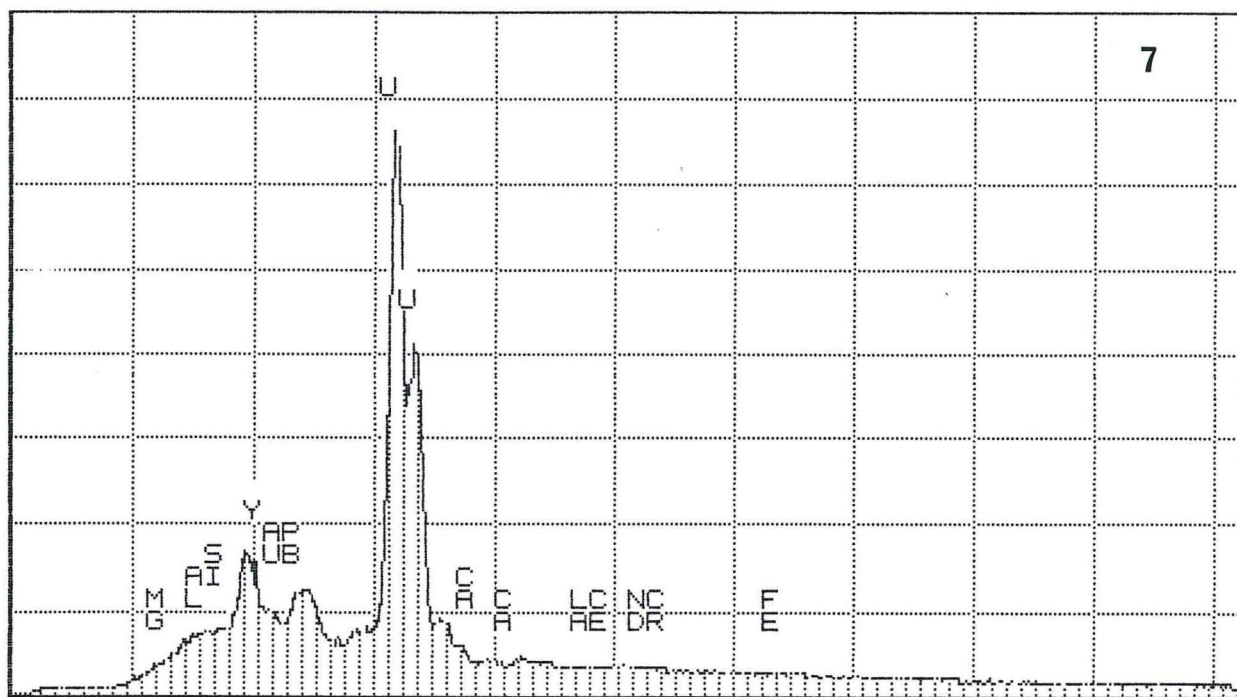
X1: Hellandite?



0.000 VFS = LOG 1 10.240

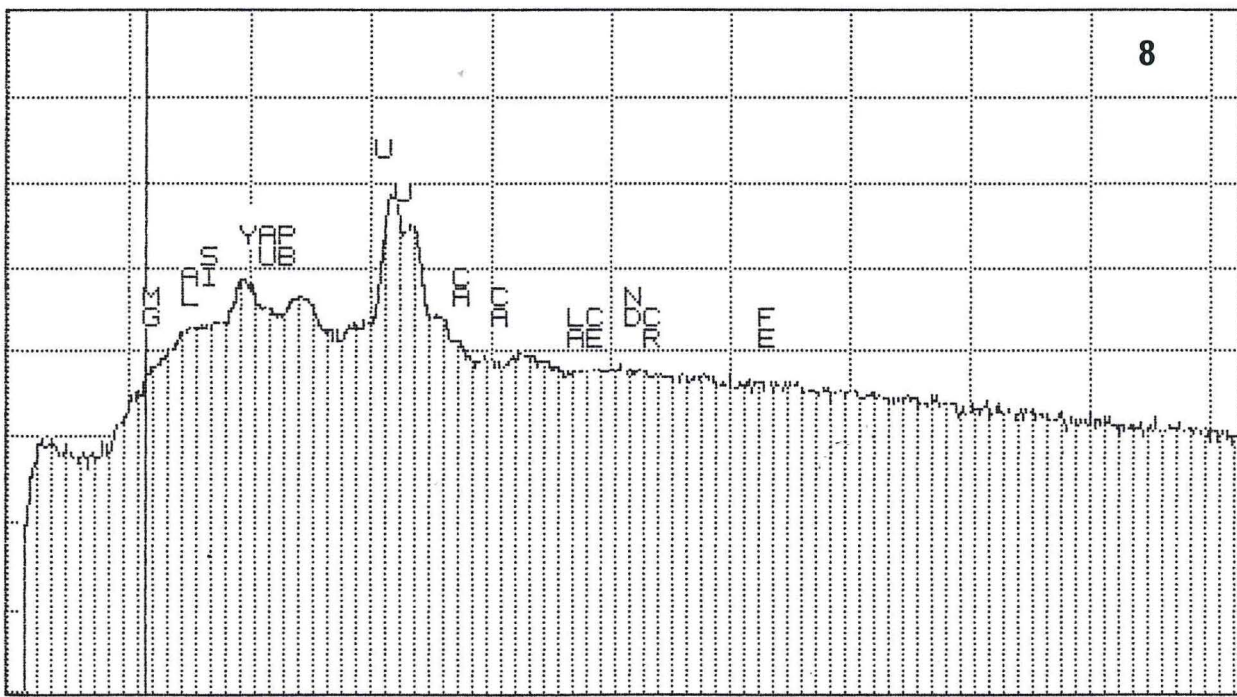
170 EMERALDE INC. F.22

X1: Hellandite?



7

0.000 VFS = 4096 10.240
112 EMERAUDE INC. F.25 X2



8

0.000 VFS = LOG 1 10.240
112 EMERAUDE INC. F.25 X2

ANNEXE V :

1) Photographies des inclusions solides dans l'émeraude de Mananjary.

Ces photos ont été prises au microscope électronique à balayage JEOL 35 C de la Faculté des Sciences et Techniques de Nantes.

Analyste : A. BARREAU.

Légende :

A : Allanite

Ap : Allanite contenant des traces de Pb

X1 : Minéral à Si, Al, Y et autres Terres Rares

X2 : Minéral uraninifère

Ph : Phlogopite

Em : Émeraude

Pl : Plagioclase

Py : Pyrite

He : Hématite

Ba : Barytine

Légende :

a - En électrons rétrodiffusés : association allanite-XI-X2.

b - En électrons rétrodiffusés : ces minéraux et cette association sont bien représentés dans l'émeraude.

c - En électrons rétrodiffusés : association phlogopite-allanite-allanite à trace de Pb-X1.

d - En électrons secondaires : voir l'abondance de ces minéraux à Terres Rares dans le plagioclase contigue à l'émeraude.

e - En cathodoluminescence : on voit quelques points luminescents.

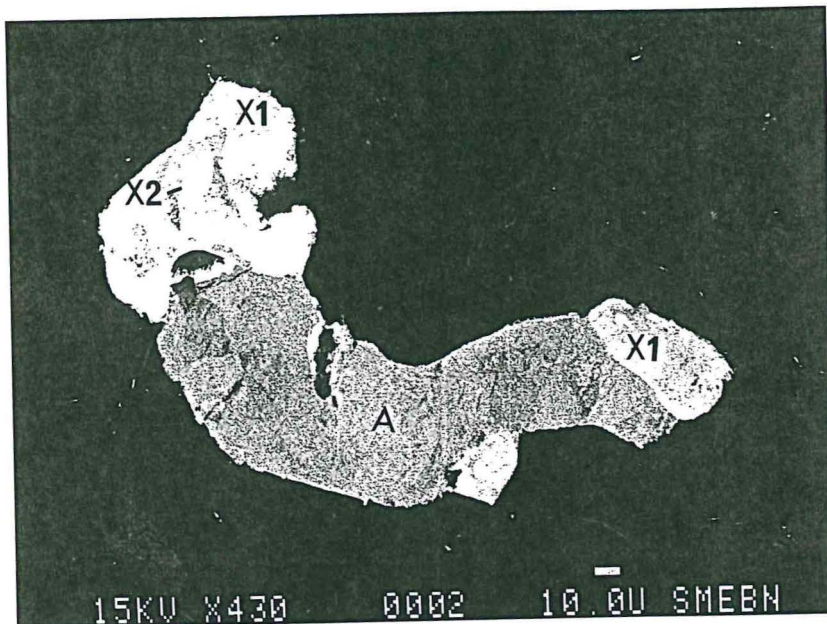
f - g - En électrons rétrodiffusés : association en zone concentrique de pyrite-hématite(ou goethite)-barytine.

h - En cathodoluminescence : réaction de la bordure à barytine.

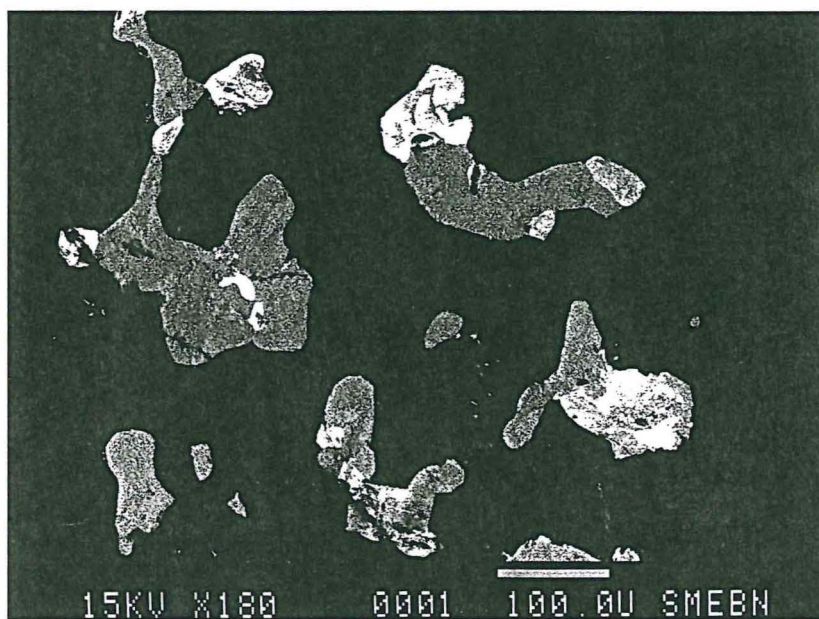
2) Photographies des inclusions solides dans l'émeraude au microscope polarisant (LN-x25)

i - Inclusions de phlogopites syngénétiques en plaques ou empilements hexagonaux ou pseudo-hexagonaux, remplissant les canaux de croissance dans l'axe C de l'émeraude.

j - Inclusions de phlogopites protogénétiques sphériques ou ovales.



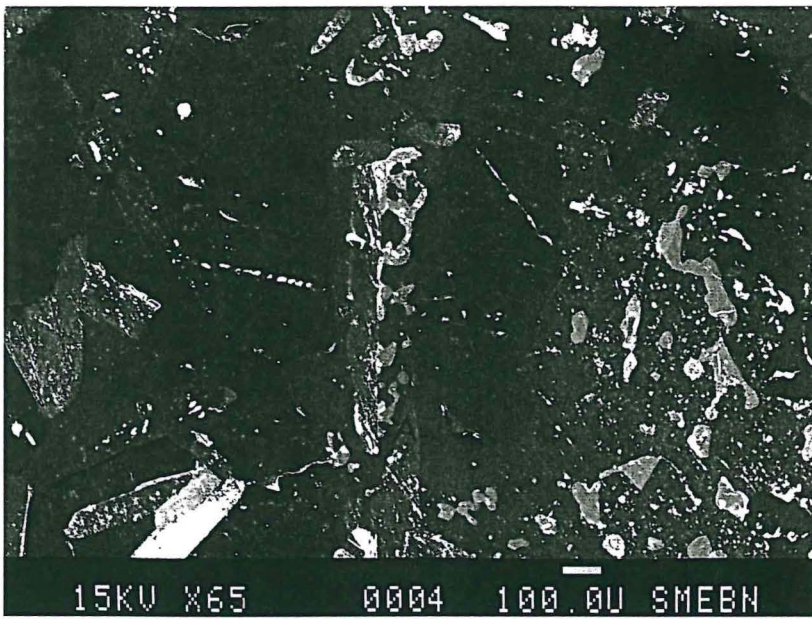
a



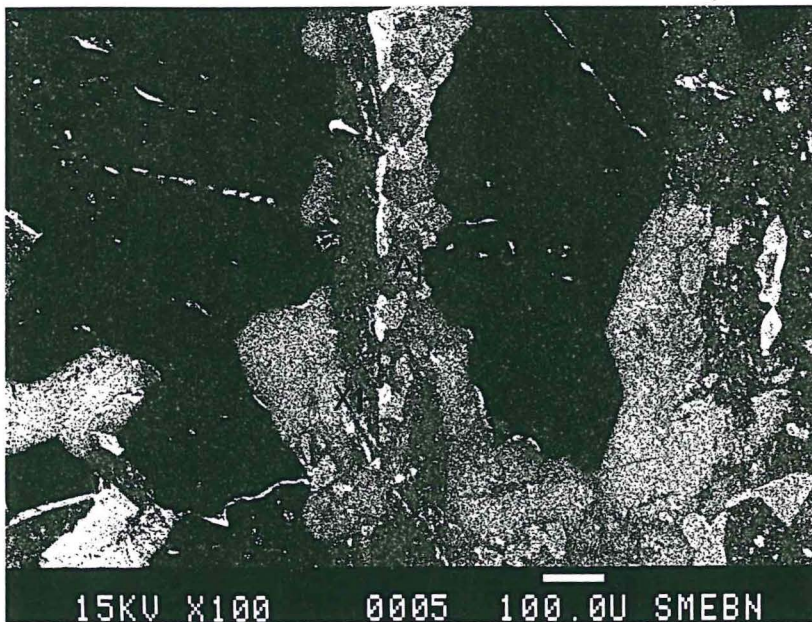
b



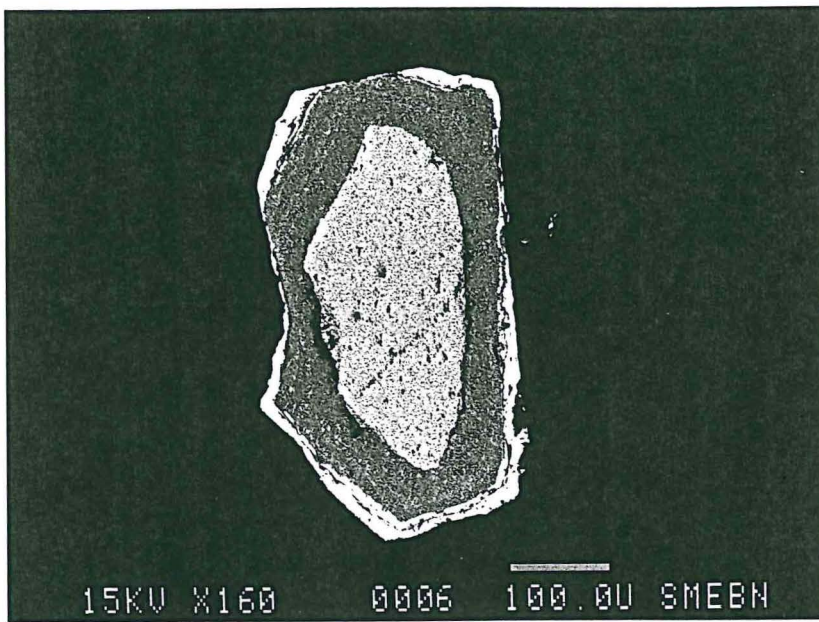
c



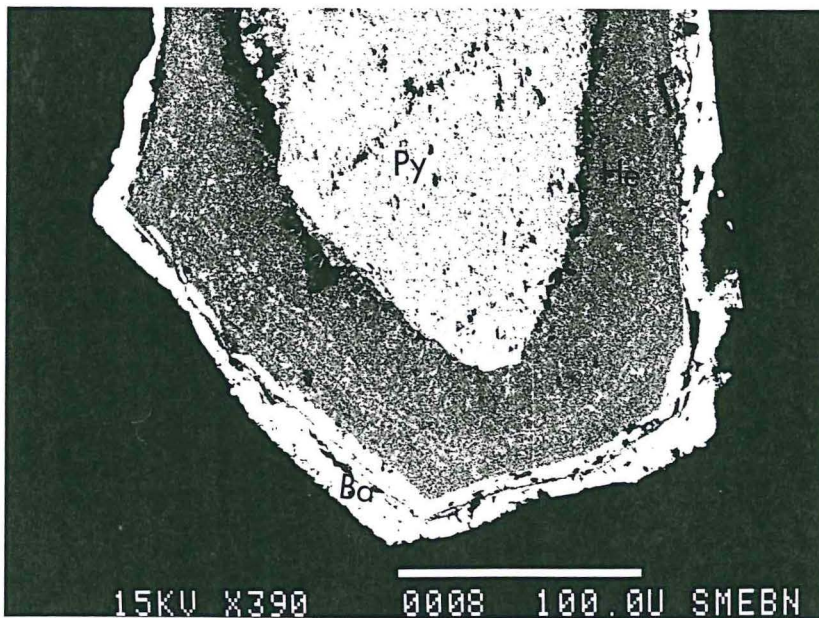
d



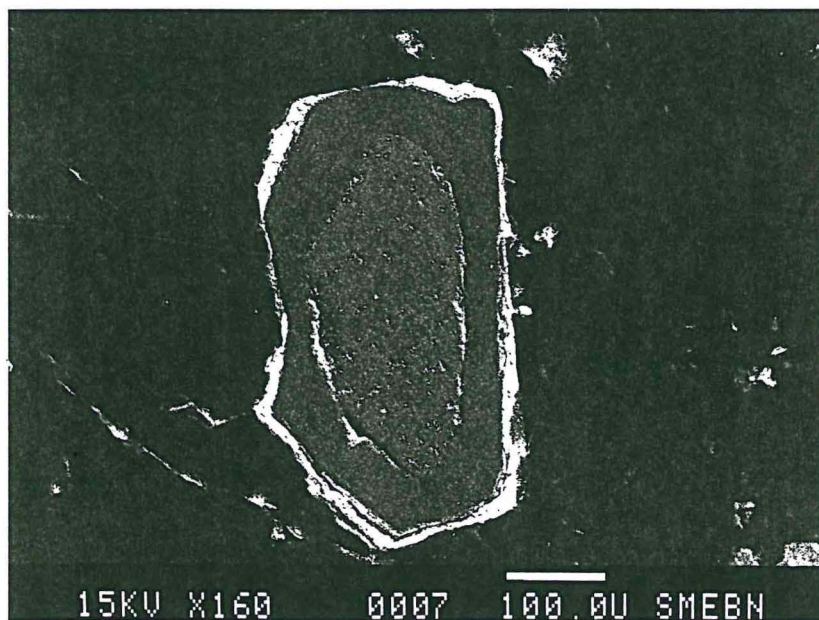
e



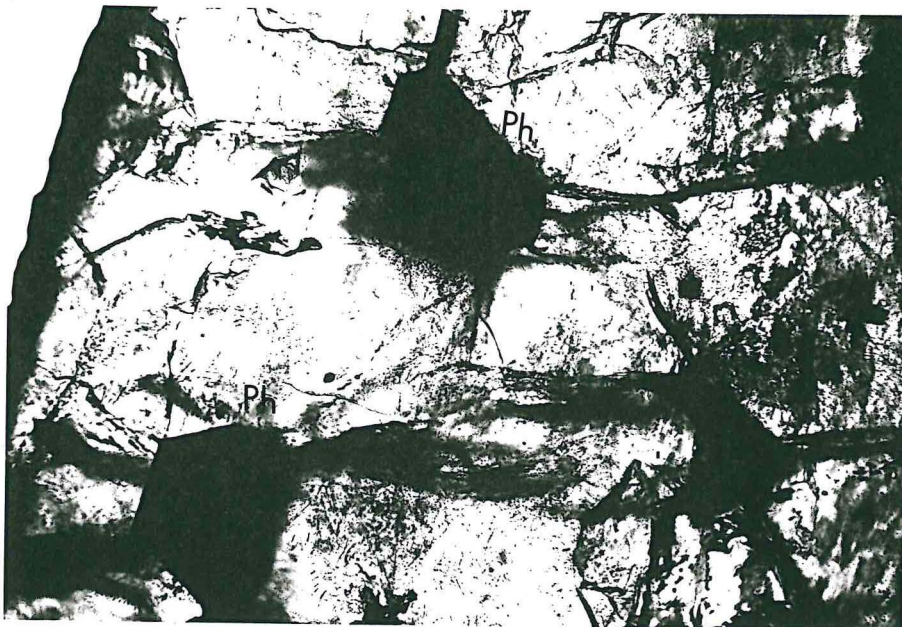
f



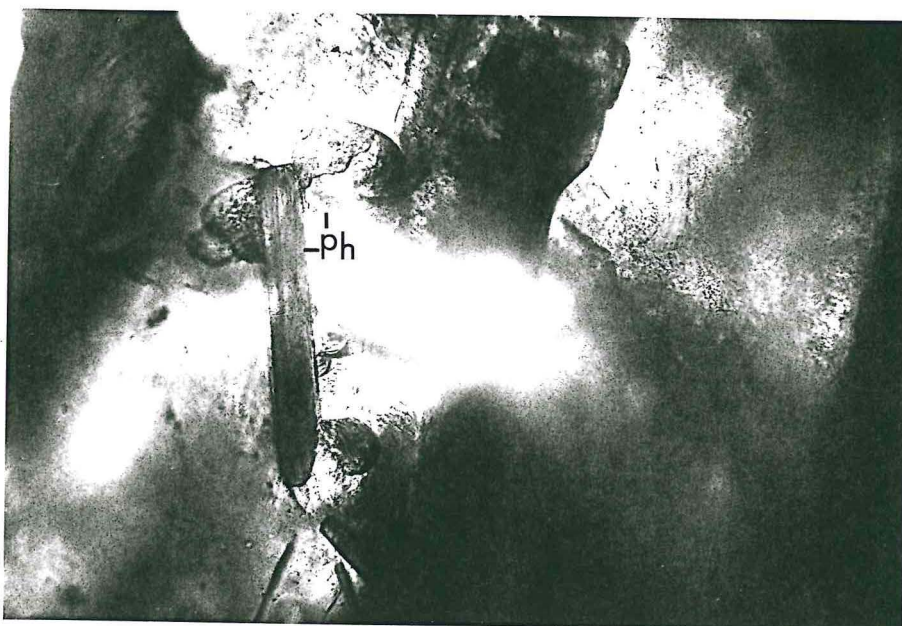
g



h



i



i

ANNEXE VI :

1) Photographies d'inclusions fluides dans l'émeraude de Mananjary au microscope polarisant, en lumière naturelle et à température ambiante.

- a - (x25) : Cristal négatif (I) à trois phases "l-l-g".
Inclusions secondaires ou pseudosecondaires en groupement linéaire.
- b - (x25) : Cristal négatif à trois phases "l-l-s" ou "l-g-s".
- c - (x25) : Cristal négatif à une phase "l" ou "g".
Groupement d'inclusions primaires (III).
Les cristaux négatifs (I) sont isolés.
- d - (x25) : Inclusions (III) à phases variées "l-l-s" ou "l-g-s" à multicomposants. La bulle de gaz est souvent plus petite que celle des cavités (I).
- e - (x25) : Multitude d'inclusions (II) et (III).
Inclusions (II) plates à phases variées: deux phases "l-l", "l-g" ou "l-s", trois phases "l-l-g" ou à multicomposants.
- f - g - h - (x65) : Inclusions (III) de forme variée mais à contour plus émoussé
En f une inclusion multiphase où la bulle de gaz est coincée par les solides.
- i - (x25) : Inclusions tubulaires (IV) en groupement linéaire.
Un givre de guérison rempli de minéraux opaques.
- j - (x65) : Inclusions(IV).
Quelques remplissages par des agrégats de solides.
- k - (x65) : Inclusions (V) secondaires en arrangement courbe et à phases variées.
- l - m - (x10) : Fissures de guérison constituées par les inclusions (V).
- n - (x65): Inclusions plates irradiées d'inclusions en dendrites.
Inclusions multiphases.
- o - (x65): "Voile" d'inclusions minuscules autour des cassures.

2) Photographies d'autres figures caractéristiques:

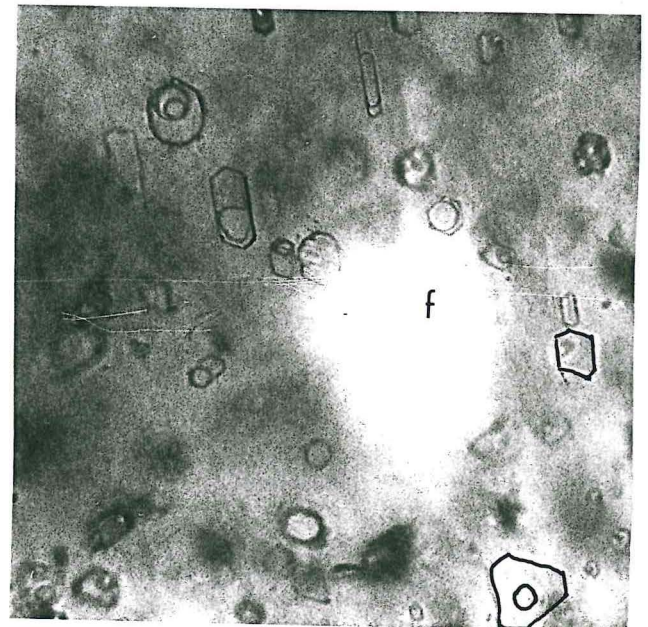
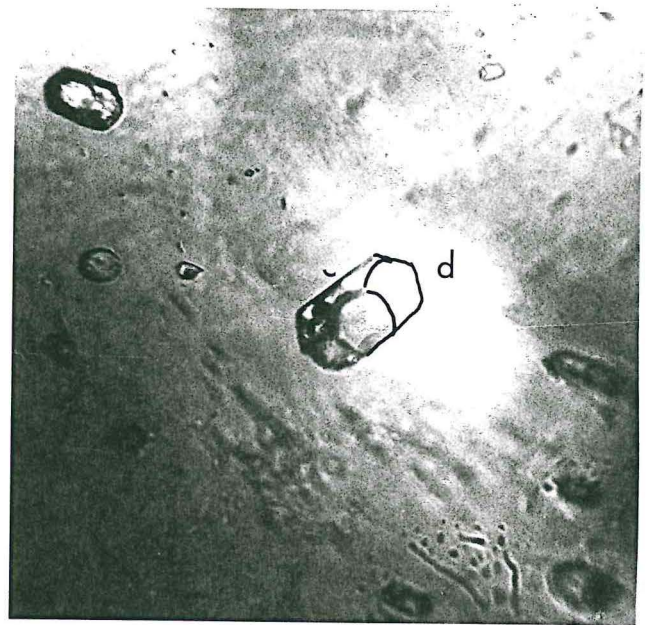
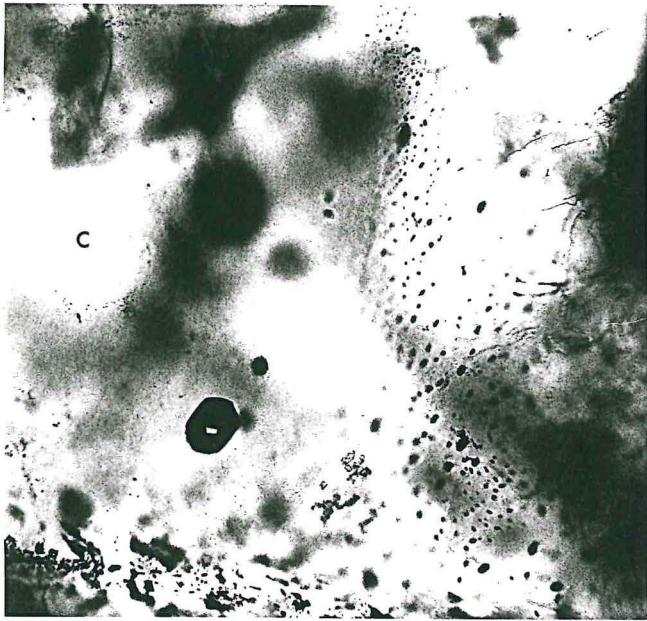
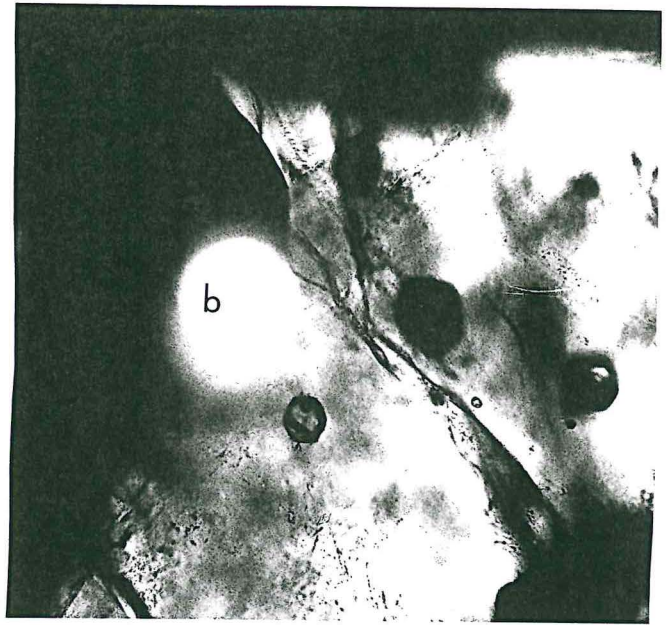
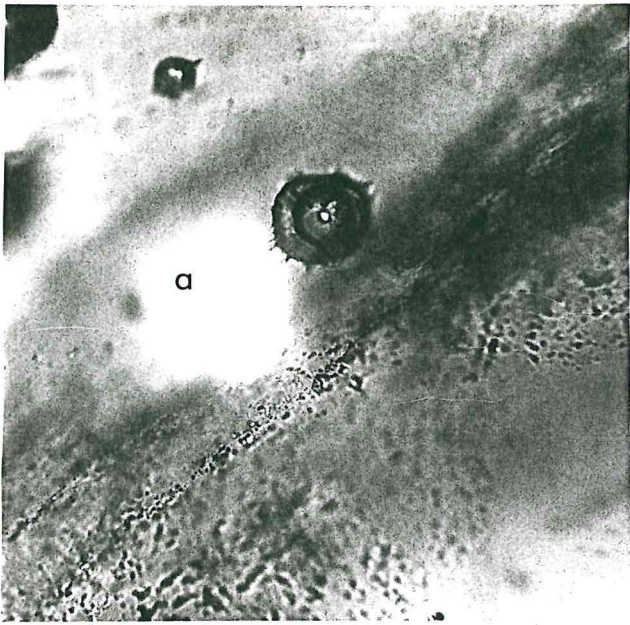
p et q : Prises au microscope polarisant, en lumière naturelle.

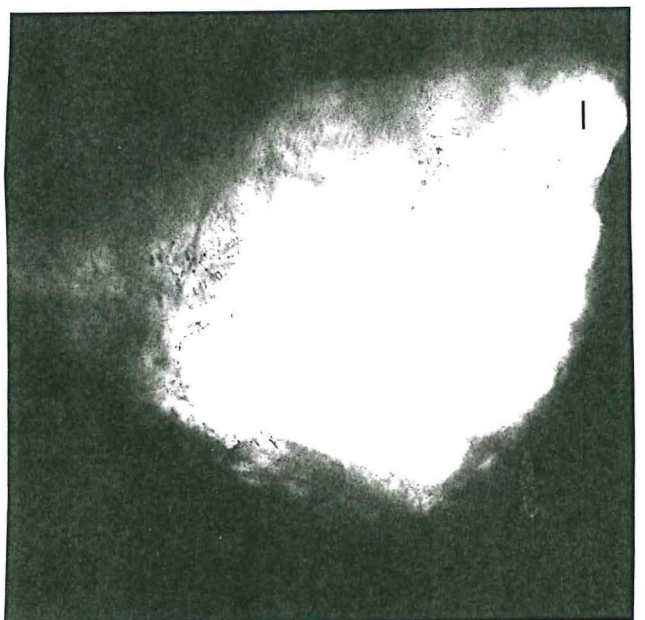
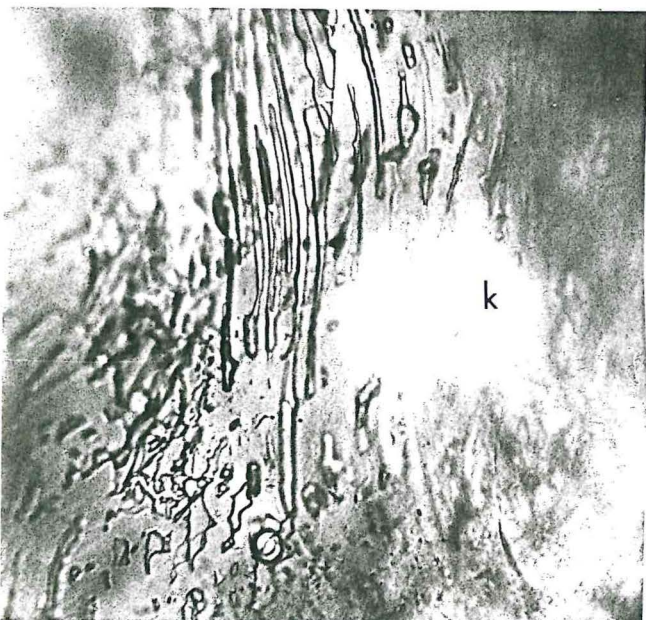
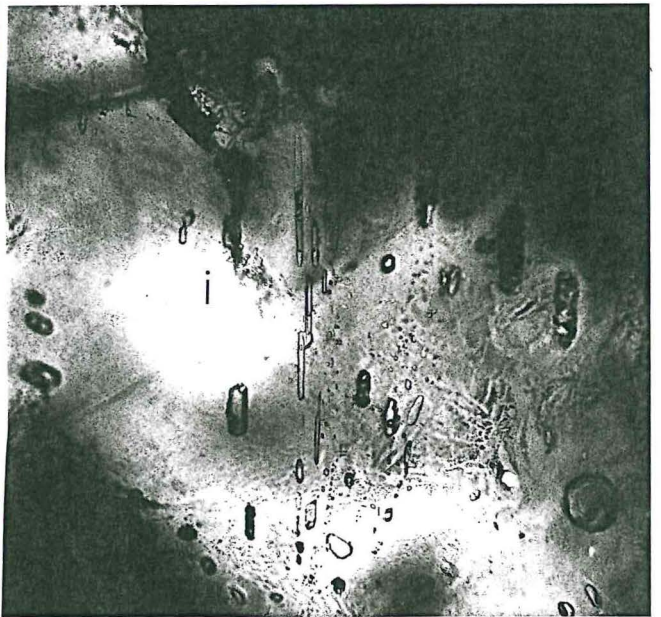
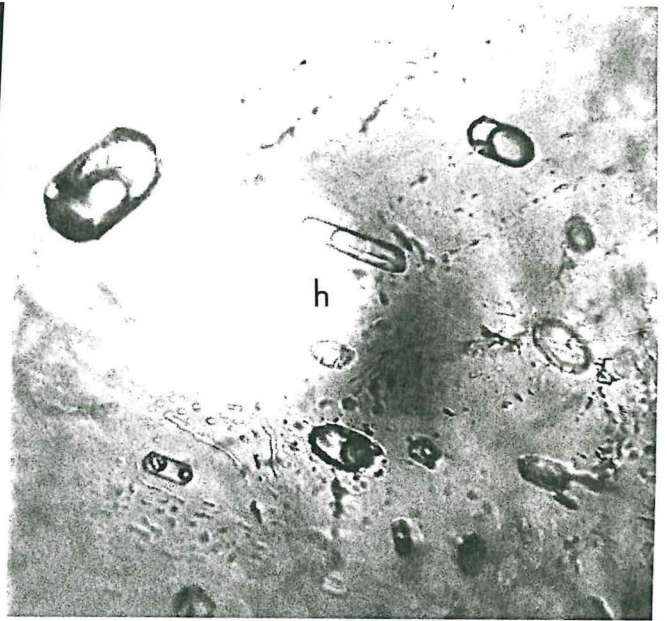
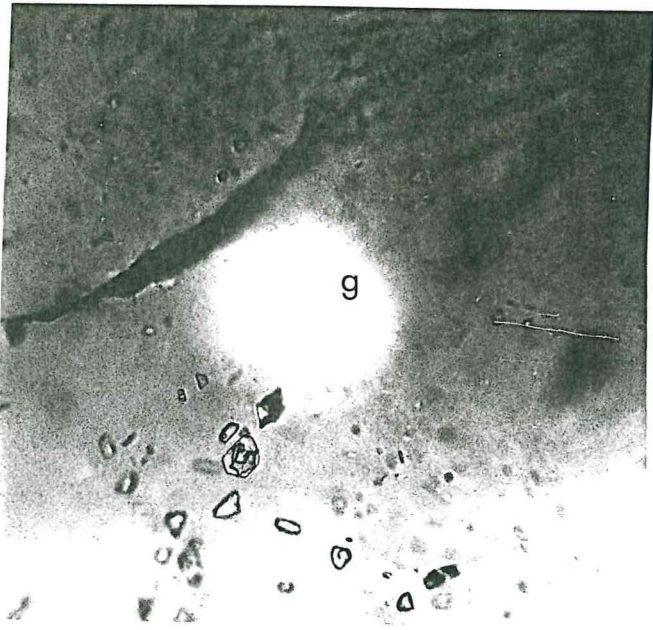
r : Prise au M.E.B. JEOL 35 C de la faculté des Sciences et Techniques de Nantes.

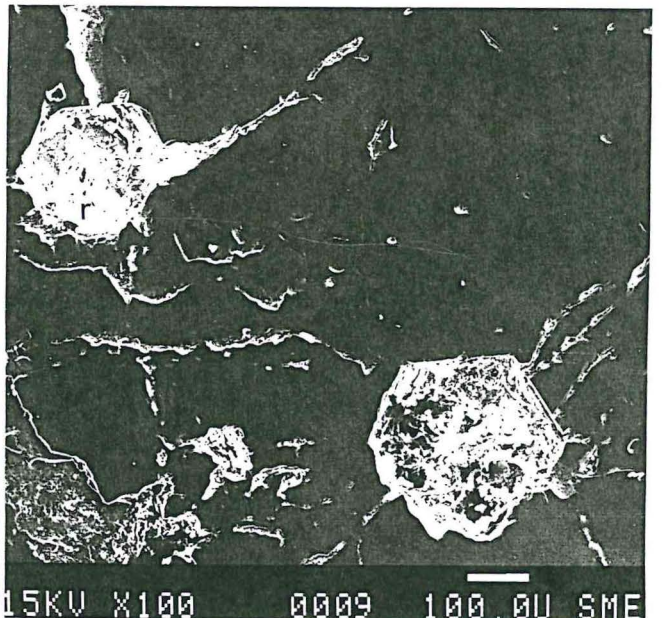
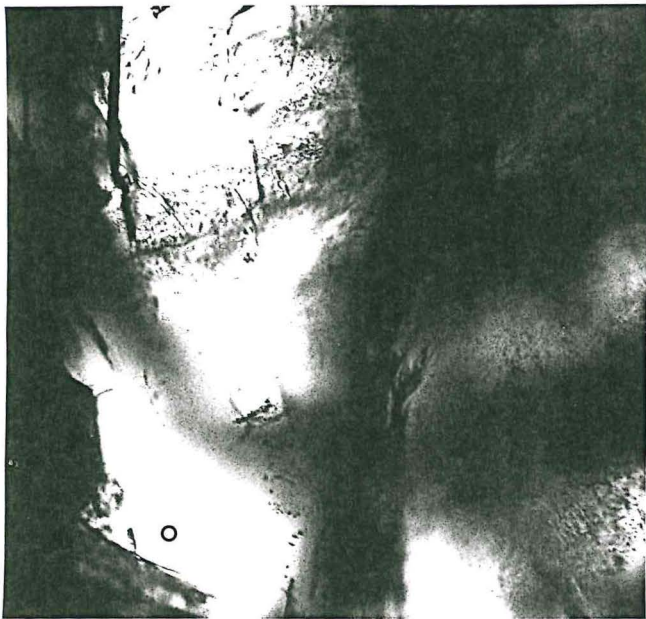
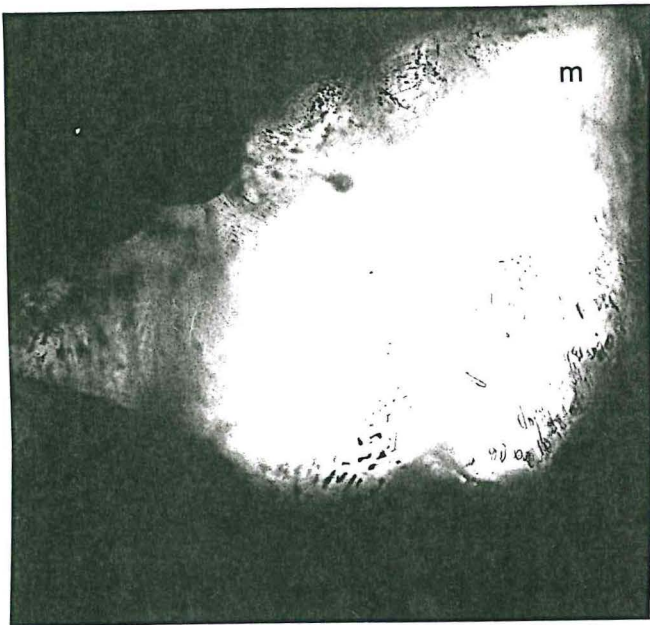
p - (x25): Distribution circulaire des canaux de croissance.

q - (x65): Canaux de croissance remplis de phlogopite ou de fluide, desquels partent des fissures reliées entre elles.

r - Canaux remplis de phlogopite.







15KV X100 0009 100.00 SME

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BEHIER J. (1962)
Note sur un indice d'émeraude dans la région de Mananjary.
Archive du Serv. Géol. d'Antananarivo, A.1845.
- BOSSHART G. (1991)- (Trad. BRAND A.)
Les émeraudes de Colombie.
Rev. de Gemmol., 105, pp.13-16.
106, pp.19-24.
107, pp.7-12.
- BOWERSOX G., SNEE L.W., FOORD E.E. et SEAL II R.R. (1991)
Emeralds of the Panshir Valley, Afghanistan.
Gems and Gemol., 27, 1, pp.26-39.
- CARIO P. (1989)
Les ressources gemmologiques actuelles de Madagascar à partir de l'évolution de la gemmologie à Madagascar entre les années 1979 et 1986.
D.U.G., Labo. de Gemmol. de Nantes.
- CHALAIN J.P. (1992)
Vers une gemmologie de laboratoire.
D.U.G., Labo. de Gemmol. de Nantes.
- GRUNDMANN G. et MORTEANI G. (1990)
Emerald mineralisation during regional metamorphism: The Habachtal (Austria) and Leysdorp (Transvaal, South Africa) deposit.
Econ. Geol., 84, pp.1835-49.
- GÜBELIN E.J. et KOIVULA J.L. (1986)
Photoatlas of inclusions in gemstones.
Ed. A.B.C. Zürich.
- HÄNNI H.A. et KLEIN H.H. (1983)
Un gisement d'émeraudes à Madagascar.
Rev. de Gemmol., A.F.G., 74, pp.3-5.
- HÄNNI H.A., SCHWARZ D. et FISCHER M. (1987)
The emerald of Belmont mine, Minas Gerais, Brazil.
Jour. of Gemol., 20, pp.446-56.

- HÄNNI H.A. (1992)
Considérations technologiques au sujet des émeraudes du Nigéria de couleur bleu-vert.
Rev. de Gemmol., A.F.G., 113, pp.2-4.
- HOTTIN G. (1976)
Présentation et essai d'interprétation du Précambrien de Madagascar.
Bull. B.R.G.M., (2), IV-2, pp.117-153.
- KANIS J., ARPS C.E.S. et ZWANN (1991)
"Machingwe": a new emerald deposit in Zimbabwe.
Jour. of Gemol., 12, 5, pp.204-212.
- KLEYENSTUBER A. (1991)
Observations in a Madagascar emerald and their possible implications.
South African Gemmologist, 5, 2, pp.4-9.
- LEUNG C.S., MERIGOUX H., POIROT J.P. et ZECCHINI P. (1983)
Sur l'identification des pierres fines et de synthèse par spectroscopie infrarouge .
Rev. de Gemmol., A.F.G., 75, pp.14-15.
- MELLINI M. et MERLINO S. (1977)
Hellandite, a new type of silico-borate chain.
Amer. Min., 62, pp.89-99.
- PIERROT R.M. et CESBRON F.F. (1989)
Chemical and determination tables of Mineralogy.
Ed. B.R.G.M.
- RUDOWSKI L. (1989)
Pétrologie et géochimie des granites transamazoniens de Camp Formoso et Carnaiba (Bahia, Brésil) et des phlogopitites à émeraude associées
Thèse Doct. de l'Univer. de Paris VI.
- SCHMETZER K. et BANK H. (1981)
An unusual pleochroism in Zambian emeralds.
Jour. of Gemol., 17, pp.443-446.
- SCHMETZER K. et KIEFERT L. (1990)
Water in beryl - a contribution to the separability of natural and synthetic emeralds by infrared spectroscopy.
Jour. of Gemol., 22, 4, pp.215-223.

- SCHMETZER K., BERNHART H. Jr., et BIEHLER R. (1991)
Emeralds from the Ural Mountains, U.S.S.R.
Gems and Gemol., 27, 2, pp.86-89.
- SCHWARZ D., HANNI H.A., FISCHER M. et MARTINS F. Jr. (1988)
*The emeralds of Fazenda Boa Esperança (Tauà / Ceara) :
occurrence and properties.*
Jour. of Gemol., 21, 3, pp.168-178.
- SCHWARZ D. et EIDT T. (1989)
The Brazilian emeralds and their occurrences: Carnaiba, Bahia.
Jour. of Gemol., 21, 8, pp.475-486.
- SCHWARZ D., EIDT T. et PEDRO A. (1990)
The Brazilian emeralds and their occurrences: Sòcòtò, Bahia.
Jour. of Gemol., 22, 3, pp.147-163.
- SCHWARZ D. et HENN U. (1992)
Emeralds from Madagascar.
Jour. of Gemol., 23, 3, pp.140-149.
- SINKANSAS J. et READ P.J. (1985)
Béryl.
Butterworths gem books, Ed. P.G. READ.
- SLIWA A.S. et NGULUWE C.A. (1984)
Geological setting of Zambian emerald deposits.
Precambrian Research, 25, pp.213-228.
- VIDAL Ph., LASNIER B. et POIROT J.P. (1992)
*Determination of the age and origin of emeralds using rubidium-strontium
analyses.*
Jour. of Gemol., 23, 4, pp.198-200.
- WOOD D.L. et NASSAU K. (1968)
*The characterisation of beryl and emerald by visible and infrared
absorption spectroscopy.*
Amer. Miner., 53, pp.777-800.