

2003

DIPLÔME D'UNIVERSITÉ DE GEMMOLOGIE

présenté
devant l'Université de Nantes
U.F.R des Sciences et des Techniques

Par

Thierry Douillard

**LES TOURMALINES DU MONT IBITY
(MADAGASCAR)**

soutenu publiquement le 10 juin 2003

au Département de Géologie

devant la commission d'examen composée de :

M. B. LASNIER	Professeur	Président
M. E. FRITSCH	Professeur	Vice - Président
M. S. LEFRANT	Professeur	Examineur
M. J. GIRARDEAU	Professeur	Examineur
M. J-P. GAUTHIER	Professeur	Examineur
M. P. MAITRALLET	Directeur du laboratoire Français de gemmologie de la CCI de Paris	Examineur
M. F. NOTARI	Directeur de GemTechLab	Examineur

REMERCIEMENTS :

Je remercie le professeur Bernard Lasnier et le professeur Emmanuel Fritsch pour leurs conseils ainsi que le professeur Fontan de l'université Paul Sabatier de Toulouse.

Non pas que la couleur emprunte son essence
De la pure matière et féconde semence
Des premiers éléments qui n'ont point de couleur
Exempts de froid, de chaud, de saveur et d'odeur
Car la couleur enfin se varie et s'altère
Selon l'œil, le mouvoir, l'objet et la lumière.
Combien a de couleur ce duvet doux et mol
Qui menu va frisant et couronnant le col,
La gorge et l'estomac des gentes colombelles,
Quand aux rais de soleil vont trémoussant les ailes ?
Tantôt vous y voyez un pourpre étinceler
Comme un feu de rubis, et tantôt découvertes
Les naïves couleurs des émeraudes vertes :
Car l'aspect gauche ou droit et le bas de nos yeux
Le mouvement, l'objet, la figure et les lieux
Font changer la couleur .

Remi Belleau (1528-1577)
(Les amours et nouveaux échanges de pierres précieuses ; 1576)

SOMMAIRE

INTRODUCTION-----	4
CHAPITRE 1 : LOCALISATION ET DESCRIPTION DE LA REGION D'IBITY----	5
1.1. GENERALITES SUR MADAGASCAR-----	5
1.2. PRESENTATION DU MONT IBITY-----	7
1.3. HISTORIQUE ET MINERALOGIE DE LA REGION-----	12
1.4. GEOLOGIE REGIONALE-----	13
CHAPITRE 2 : LES TOURMALINES DU MONT IBITY-----	15
2.1. GENERALITES SUR LA TOURMALINE-----	15
2.1.1. PRINCIPALES CARACTERISTIQUES-----	15
2.1.2. STRUCTURE CRISTALLINE-----	16
2.1.3. CLASSIFICATION DES TOURMALINES-----	17
2.2. LA LIDDICOATITE-----	19
2.2.1. PROPRIETES PHYSIQUES-----	20
2.2.2. PROPRIETES OPTIQUES-----	20
2.2.3. CHIMIE-----	21
2.3. L'ELBAITE-----	22
2.3.1. PROPRIETES PHYSIQUES ET OPTIQUES-----	22
2.3.2. CHIMIE-----	23
2.4. PRESENTATION ET GEMMOLOGIE CLASSIQUE DES ECHANTILLONS ANALYSES-----	24
2.4.1. DESCRIPTION DES ECHANTILLONS-----	24
2.4.2. CRISTALLOGRAPHIE-----	27
2.4.3. LES ZONATIONS DE COULEUR -----	29
2.4.4. LES INCLUSIONS-----	30
2.4.5. FACETTAGE DES TOURMALINES-----	31
CHAPITRE 3 : ANALYSE DE LABORATOIRE-----	32
3.1. MESURES EN MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE -----	32
3.1.1. PRINCIPE DU MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (MEB)--	32
3.1.2. MESURES REALISEES-----	32
3.2. SPECTROMETRIE UV-VISIBLE-PROCHE INFRAROUGE-----	36
3.3. CONCLUSION -----	42
BIBLIOGRAPHIE-----	43

INTRODUCTION - PRESENTATION .

Projet de recherche et objectifs de ce DUG.

Ayant déjà effectué plusieurs voyages à Madagascar et appréciant la tourmaline pour la variété de couleurs qu'elle offre, j'ai décidé de rédiger ce DUG en m'intéressant aux tourmalines du mont Ibity (centre de Madagascar). De plus, on trouve peu d'études réalisées sur les liddicoatites dans la littérature, alors qu'elles sont nombreuses dans cette région.

Les objectifs de cette recherche sont tout d'abord de déterminer les différentes variétés de tourmaline se trouvant dans cette région. Parmi les échantillons ramenés j'en ai facetté onze, et neuf autres cristaux bruts ont été utilisés pour cette étude. La gemmologie classique a été utilisée ainsi que la gemmologie de laboratoire.

Ensuite, j'ai voulu connaître les différents minéraux qui y sont associés et voir les différentes gammes de couleurs qui nous sont offertes. Enfin, nous avons analysé la cause de la couleur et les inclusions de ces tourmalines.

CHAPITRE 1 : LOCALISATION ET DESCRIPTION DE LA REGION D'IBITY

1.1 GENERALITES SUR MADAGASCAR



Figure 1: Carte de Madagascar.
En encadré au centre, région où se situe le mont Ibity, au Sud d'Antsirabe.

Madagascar s'étend sur 1600 km de long et 580 km de large. Situé entre le canal du Mozambique et l'Océan Indien, ce pays a une superficie de 590 000 km² (France 547 000 km²). C'est la quatrième plus grande île du monde.

Le pays est entouré par d'autres îles et archipels dont l'île Maurice, les Seychelles, les Comores et la Réunion.

Le pays est divisé administrativement en six provinces (Toamasina, Mahajanga, Toliary, Antananarivo, Antsiranana et Fianarantsoa). La région d'Ibity fait partie de la province d'Antananarivo.

Capitale : Antananarivo (Tananarive)

Population : 18 millions

Groupes ethniques : 18 (merina, betsileo, sakalava,.....)

Langue officielle : malgache

Langue coloniale : français

ECONOMIE :

Les cultures vivrières (riz, manioc), l'élevage bovin extensif et la pêche sont les bases de l'activité nationale. Le café, la vanille (premier rang mondial), le girofle et la canne à sucre assurent 60% des recettes dues aux exportations. L'île produit aussi du chrome, du mica et du graphite.

1.2 PRESENTATION DU MONT IBITY

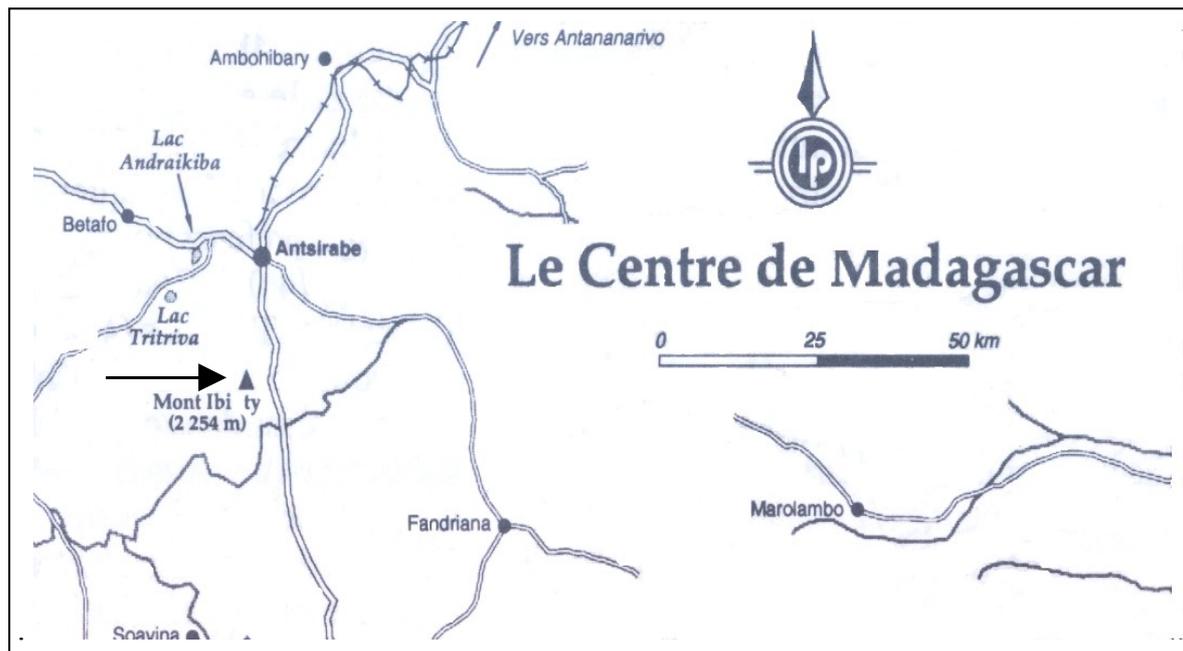


Figure 2: Localisation du mont Ibity au sud d'Antsirabe .
Extrait de Lonely Planet « Madagascar et Comores » ed.1998.

Au départ de Paris, il faut onze heures d'avion pour atteindre Tananarive. De là, on arrive à Antsirabe après quatre heures de bus.

Antsirabe est à la fois noyau industriel (coton, agro-alimentaire.....), centre de thermalisme et principal carrefour du commerce de pierres précieuses et de minéraux. Cette ville est située à environ 1500 m d'altitude et compte environ 120 000 habitants. Juste à l'Ouest de la route méridionale qui mène à Ambositra, à environ 25 km d'Antsirabe, se dresse le mont Ibity qui culmine à 2254 m d'altitude.

On accède au petit village d'Ibity (figure 3) en taxi brousse, par une petite route non goudronnée qui serpente parmi les monts volcaniques et nous fait apprécier un paysage de rizières, de terres rouge intense, de plantations de maïs et de tabac. Dans ce petit village, se déroule chaque semaine un grand marché où l'on trouve toutes sortes de produits de la région et des vendeurs de pierres (principalement des tourmalines) qui viennent monnayer leur prospection de la semaine. A proximité du village il existe une cimenterie qui travaille de façon mécanisée.



Figure 3: Le village d'Ibity un jour de marché. Il n'est constitué que de quelques habitations et le jour de marché permet aux habitants des villages environnants de venir se ravitailler en produits divers. Photo février 2002.

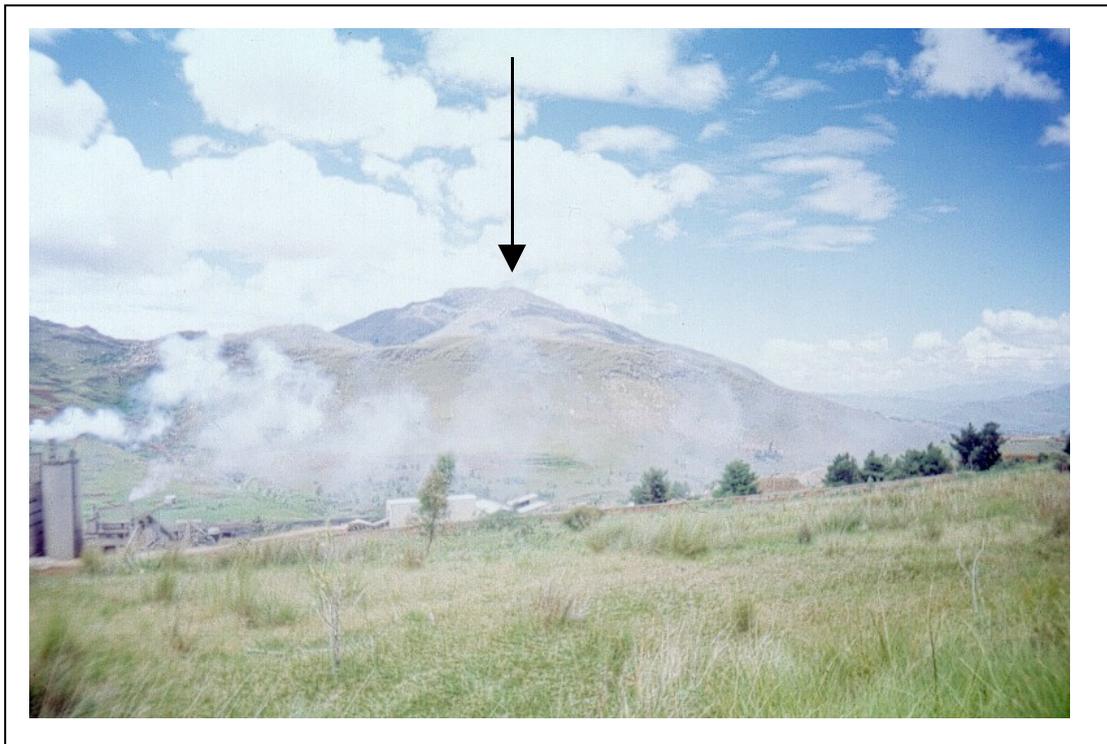


Figure 4: Mont Ibity (2254 m); Sur la gauche on peut apercevoir la cimenterie. Cette face de montagne est exposition Nord. Photo février 2002.

Du village, on accède aux carrières de tourmaline après environ deux heures de marche. Il faut s'enfoncer dans la vallée de Sahatany (figure 5), traverser la rivière Sahananana (figure 6) et passer quelques villages éparpillés dans la vallée. On atteint la pegmatite de Manjaka (figure 9) qui se trouve sur le flanc Est du mont Mahavololona et sur la rive droite de la rivière ; cet endroit est connu pour la belle couleur de sa rubellite « rouge sang de pigeon » (échantillon TD04 figure 12).

Tout au long de la marche, on découvre des rizières dans un paysage verdoyant. Si la saison des pluies n'est pas trop forte, on peut passer aisément la rivière sinon on peut s'attendre à se mouiller jusqu'au bassin.

Au sol, on peut constater la présence de schorl, qui riche en Fe a cristallisé avant les tourmalines plus riche en Li. Il se trouve donc en zone externe.

A l'arrivée à la carrière, un petit village se dresse au pied des nombreux puits qui sont creusés à flanc de montagne.



Figure 5: La vallée de Sahatany; au loin on peut distinguer des rizières. La photo a été prise dos au mont Ibity. Photo février 2002.



Figure 6: Rivière Sahananana que l'on peut traverser à pied. Elle traverse la vallée de Sahatany et à cet endroit on est à mi-chemin de la pegmatite de Manjaka. La photo a été prise sur la rive Ouest de la rivière. Photo février 2002.

Ce sont les villageois qui s'occupent de l'extraction de façon artisanale. Ils creusent avec des pelles et des pioches jusqu'à environ dix-quinze mètres de profondeur pour atteindre le filon. Les puits sont en escalier; cela limite les risques d'effondrement dus à la friabilité des sédiments. On y descend à la bougie pour atteindre les filons de pegmatite. Le sol est tapissé de schorl et de mica. On peut aussi voir des hommes et des femmes tamiser dans des trous d'eau.

La plupart des mineurs qui travaillaient ici il y a quelques années et les jeunes de la région ont pour la plupart migrés vers Ilakaka (au Sud du pays où se trouve un important gisement de saphir). La production s'en ressent et est donc pénalisée. Je n'ai hélas pas pu obtenir de chiffres de production annuelle.

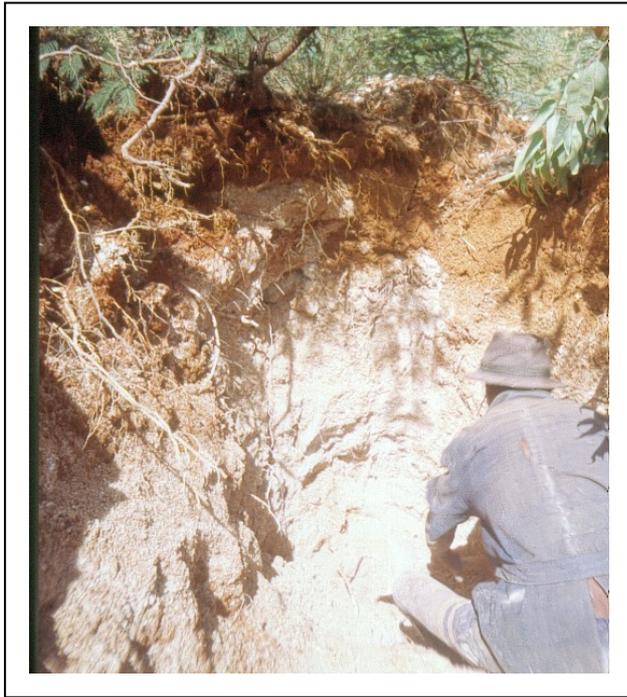


Figure 7: Pegmatite de Manjaka. Villageois qui commence à creuser un nouveau puit. On peut remarquer la nuance de couleur blanche de la terre qui démontre des feldspaths altérés en kaolinite. Photo février 2002.

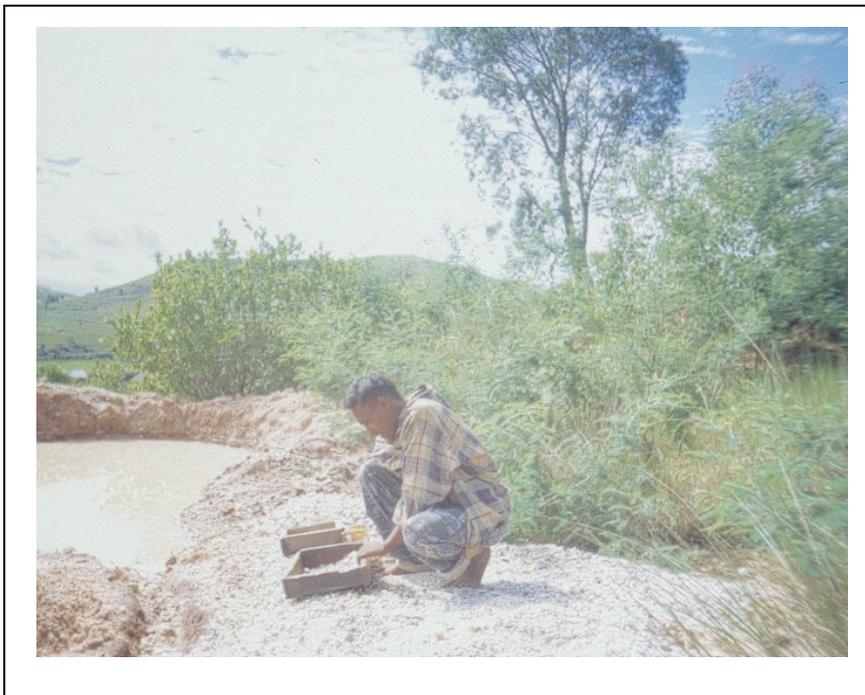


Figure 8 : Villageois au triage des tourmalines. Pegmatite de Manjaka. Photo février 2002.

1.3 HISTORIQUE ET MINÉRALOGIE DE LA RÉGION.

Les tourmalines polychromes sont connues depuis 1888. Puis très rapidement intervint la découverte de pegmatites près du mont Ibity. Toute cette zone recèle d'importants gisements, en particulier dans la vallée de Sahatany.

Formés de quartzites et de cipolins métamorphisés par le granite, cette région est particulièrement riche. Les feldspaths alcalins et les minéraux borés (danburite, rhodizite, hambergite) y sont abondants et bien cristallisés, de même que les minéraux lithiques (spodumène, lépidolite), des minéraux calciques apparaissent à proximité des calcaires. D'énormes géodes renfermant des cristaux de tourmaline d'une belle couleur bleue ont été rencontrées à Antabaoka, près du village de Mandrivo, accompagnées d'amazonite et de quartz fumé. Des rubellites associées parfois à de superbes morganites, d'un rose inhabituel et très recherché dénommé « fleur de pêcher », ont été trouvées à plusieurs reprises.

Mais la pegmatite la plus intéressante est celle d'Anjanaboina (près de Betafo figure 2), découverte en 1894. Elle est située près de la rivière Mania. Vers 1911, le site produisit environ 15 tonnes de tourmaline polychrome. Entre 1920 et 1925, plus de 1700 tonnes furent extraites. Abandonné en 1976, le gisement avait été exploré par une centaine de mineurs, avec des fortunes diverses, des cristaux décimétriques d'une grande qualité furent découverts, la plupart d'entre eux sciés afin de mettre en valeur les structures d'accroissement zonées de couleurs variées. (Arem J., 1987)

D'après Lacroix (1922) dans son ouvrage « Minéralogie de Madagascar », des gisements de tourmaline ferrifère se trouvent dans les pegmatites potassiques du mont Ibity. Des tourmalines jaune d'or à jaune citron (les plus riches en manganèse) se trouvent surtout à Tsilaizina, sur le revers oriental du mont Ibity. La lazulite est un élément microscopique des quartzites à gros grains qu'il colore en bleu clair. Sur les derniers contreforts du mont Ibity, se trouve un filon de pegmatite renfermant du beryl verdâtre, de la rubellite et des cristaux de bismuth natif. Les quartzites et micaschistes renferment fréquemment de la tourmaline noire. On trouve aussi des grenats grossulaire dans les veines de pegmatite.

Besairie (1953, 1966) se basant sur les travaux de Lacroix consigne tous les indices de pierres de joaillerie et d'ornementation d'intérêt économique de la région.

1.4. GÉOLOGIE RÉGIONALE.

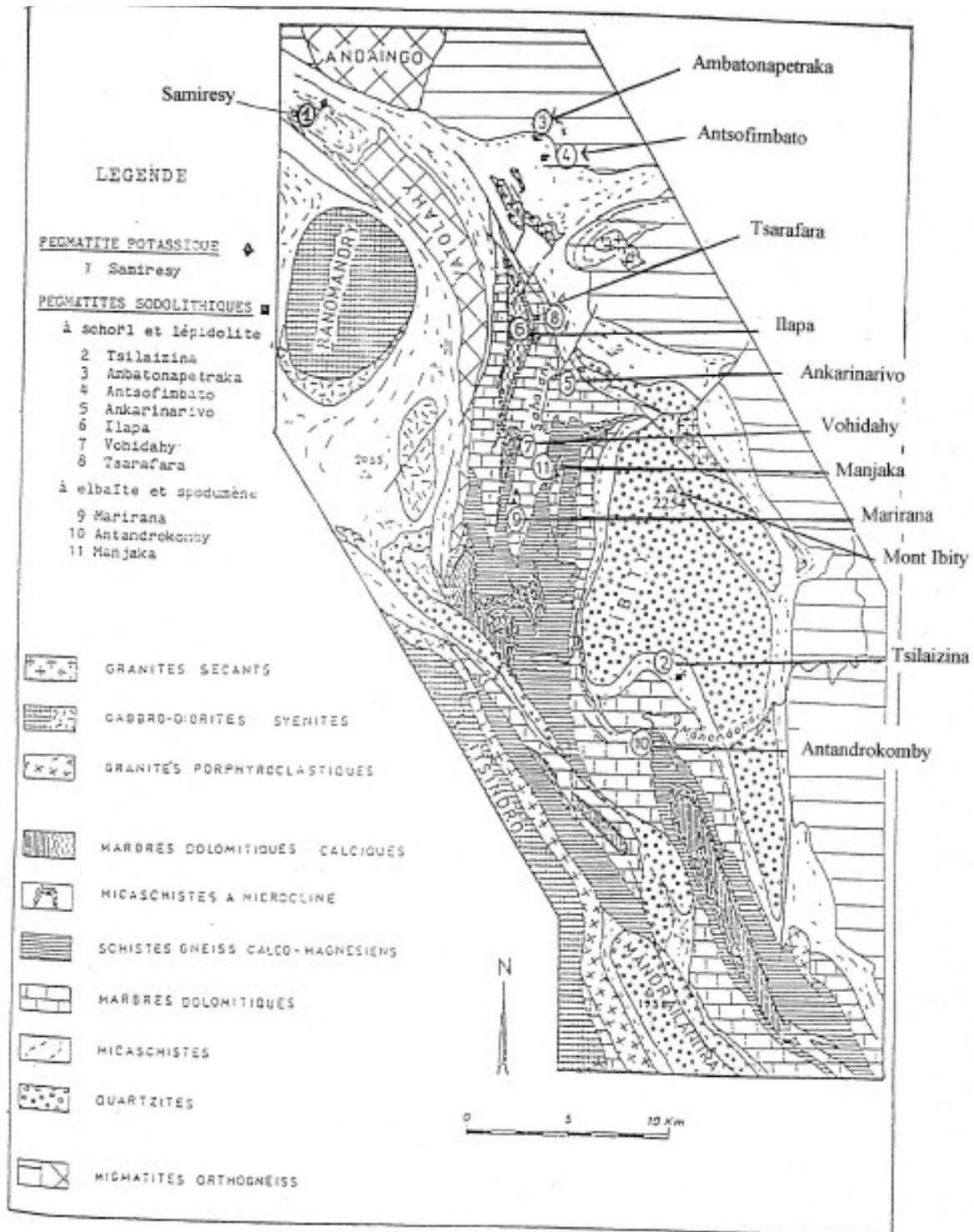


Figure 9 : carte géologique de la région d'Ibity

Le champ de la Sahatany, d'âge Panafricain, se situe dans un ensemble protérozoïque constitué dans l'ordre stratigraphique de :
(Ces renseignements proviennent de Ranorofoa N. 1986)

Marbre dolomitique et calcique, micaschiste à microline, gneiss calco-magnésien, micaschiste à biotite, quartzite.

On distingue deux types principaux de pegmatites :

Les pegmatites potassiques qui comprennent une zone externe de schorl, comme par exemple celle de Samiresy (1 sur la figure 9).

Les pegmatites sodolithiques ; elles se subdivisent en deux sous-groupes :

a) Les pegmatites qui présentent une zone externe à schorl associée ou non à la biotite et spessartite et une zone interne à elbaïte, lépidolite, muscovite, béryl et biotite lithinifères. Ce sont Tsilaizina, Ambatonapetraka, Antsofimbato, Ilapa, Vohidahy, Ankarinarivo et Tsarafara.

b) Les pegmatites à elbaïte et spodumène. Le spodumène peut être accessoire dans le groupe de Mirana ou abondant à Antandrokomby et Manjaka où apparaît aussi la rhodizite.

Les pegmatites de Samiresy, Tsilaizina, d'Ambatonapetraka et d'Antsofimbato sont situées dans des alternances de micaschistes à muscovite, biotite, parfois à almandin ou à sillimanite, et de quartzite surtout mono minérales mais parfois à muscovite et biotite (Ambatonapetraka et Antsofimbato) ou à trémolite et biotite (Tsilaizina).

La pegmatite d'Ankarinarivo est pour un tiers Ouest dans une alternance de lits de trémolite à talc, quartzite à grains fins, et de micaschistes à biotite, tandis que les deux tiers Est sont des quartzites mono minéraux à muscovite rare.

Les marbres dolomitiques et calciques contiennent accessoirement diopside, trémolite et phlogopite, plus rarement de la scapolite.

Les gneiss calcomagnésiens sont essentiellement à trémolite et diopside, avec accessoirement du quartz, microline, phlogopite, dolomite et calcite et plus rarement de la scapolite.

Les pegmatites de Tsarafana Sud, Marirana et Antandrokomby sont situées dans des marbres dolomitiques.

Celles d'Ilapa, Vohidahy, Manjaka se trouvent dans deux encaissements différents : Marbre et quartzite pour Ilapa ; marbre dolomitique et gneiss calcomagnésien pour Vohidahy et Tsarafana nord.

CHAPITRE 2 : LES TOURMALINES DU MONT IBITY

2.1 GENERALITES SUR LA TOURMALINE

La tourmaline se présente fréquemment en longs prismes striés verticalement. Les cristaux ont une section triangulaire curviligne avec 3, 6 ou 9 faces principales. La composition chimique complète de la tourmaline ne fut connue qu'au cours du XIX^e siècle, le bore n'ayant été isolé qu'en 1808.

Actuellement, la formule chimique de la tourmaline, silicate complexe boro-alumineux, peut s'écrire sous la forme structurale :

$(X)(Y_3)(Z_6)(BO_3)_3 Si_6 O_{18} (OH,O)_3 (OH,F)$ avec $X=Na, Ca$ ou vacant ; $Y=Al, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Li, Mg, Mn^{2+}$; $Z=Al, Cr^{3+}, Fe^{3+}, V^{3+}$.

Les principaux pays produisant de la tourmaline sont : le Brésil, le Mexique, les Etats-Unis, le Myanmar, l'Afghanistan, le Pakistan, l'Inde, le Sri Lanka, le Kenya, Madagascar, le Mozambique, la Namibie, le Nigéria, la Tanzanie, la Zambie, le Zimbabwe et la Russie.

2.1.1 PRINCIPALES CARACTERISTIQUES.

Toutes les tourmalines appartiennent au système rhomboédrique. Pour chaque caractéristique, nous avons pris les deux extrêmes parmi les différentes espèces de tourmaline.

DIMENSIONS DE LA MAILLE : $a=15,803 \text{ \AA}$ (olénite) - $16,181 \text{ \AA}$ (povondraite) ,
 $c=7,085 \text{ \AA}$ (olénite) - $7,444 \text{ \AA}$ (povondraite).

DURETE : 7 à 7,5.

DENSITE : 3,01 (uvite)-3,39 (chromdravite).

SIGNE OPTIQUE : uniaxe négatif

INDICES DE REFRACTION : $n_e=1,619$ (uvite)- $1,772$ (chromdravite) ;
 $n_o=1,634$ (uvite)- $1,778$ (chromdravite) .

BIREFRINGENCE : de 0,018 à 0,029.

CASSURE : conchoïdale, subconchoïdale à grenue ou inégale.

FLUORESCENCE : faible ou absente.

CLIVAGE : rarement.

PLEOCHROISME : généralement fort.

2.1.2 STRUCTURE CRISTALLINE.

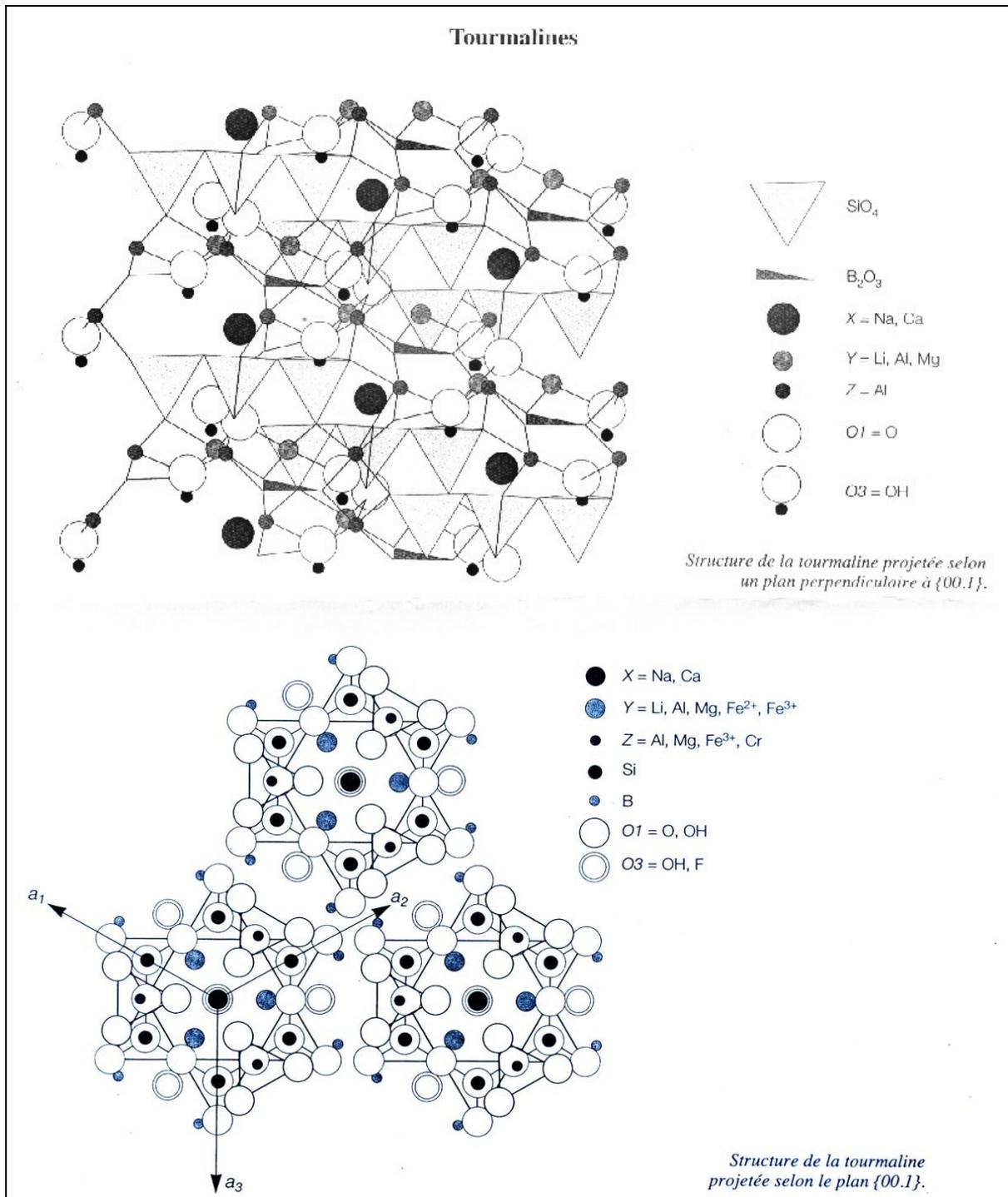


Figure 10 : Structure de la tourmaline .
(Cassedanne & al, 1996)

Schématiquement, la structure de la tourmaline, caractéristique d'un cyclosilicate, repose sur l'alternance d'anneaux silicatés Si_6O_{18} constitués de six tétraèdres SiO_4 et de groupes triangulaires BO_3 . Les anneaux Si_6O_{18} et les groupes boratés (BO_3) sont liés entre eux par l'intermédiaire de trois groupes octaédriques $\text{YO}_4(\text{OH})_2$ disposés selon une symétrie ternaire et dont le centre est occupé par de petits cations Li^+ , Mg^{2+} , Al^{3+} , Fe^{2+} ou Fe^{3+} . Enfin chaque anneau silicaté est lié latéralement à six autres anneaux Si_6O_{18} par l'intermédiaire de six groupes octaédriques $\text{ZO}_5(\text{OH})$ dont le centre est occupé par Mg^{2+} , Al^{3+} , Fe^{3+} ou Cr^{3+} .

2.1.3 CLASSIFICATION DES TOURMALINES.

Il existe 13 espèces de tourmalines recensées à ce jour.

Le site X est en général occupé par Na, plus rarement par Ca et peut être vacant comme dans la rossmanite ou dans la foïtite.

Le site Y est le plus large et le plus distordu des deux sites octaédriques; il peut contenir des cations monovalents (par exemple Li dans l'elbaïte), bivalents (par exemple Mg^{2+} dans la dravite), trivalents (par exemple Fe^{3+} dans la buergerite et dans quelques cas rares V^{3+} ou Cr^{3+}), ou tétravalents Ti^{4+} .

Le site Z, extérieur aux anneaux, est plus petit que Y et contient généralement Al. Le silicium qui occupe les sites tétraédriques peut être partiellement substitué par Al. (Donnay & Barton, 1972 ; Foit & Rosenberg, 1979).

Espèces	X	Y ₃	Z ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	V ₃	W
ELBAITE	Na	Li _{1,5} Al _{1,5}	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
SCHORL	Na	Fe ²⁺ ₃	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
DRAVITE	Na	Mg ₃	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
OLENITE	Na	Al ₃	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	O ₃	(OH)
CHROMDRAVITE	Na	Mg ₃	Cr ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
BUERGERITE	Na	Fe ³⁺ ₃	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	O ₃	F
POVONDRAITE	Na	Fe ³⁺ ₃	Fe ³⁺ ₄ Mg ₂	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	O
LIDDICOATITE	Ca	Li ₂ Al	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	F
UVITE	Ca	Mg ₃	MgAl ₅	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	F
HYDROXY-FERUVITE	Ca	Fe ²⁺ ₃	MgAl ₅	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
ROSSMANITE	–	LiAl ₂	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
FOITITE	–	Fe ²⁺ ₂ Al	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
MAGNESIO-FOITITE	–	Mg ₂ Al	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)

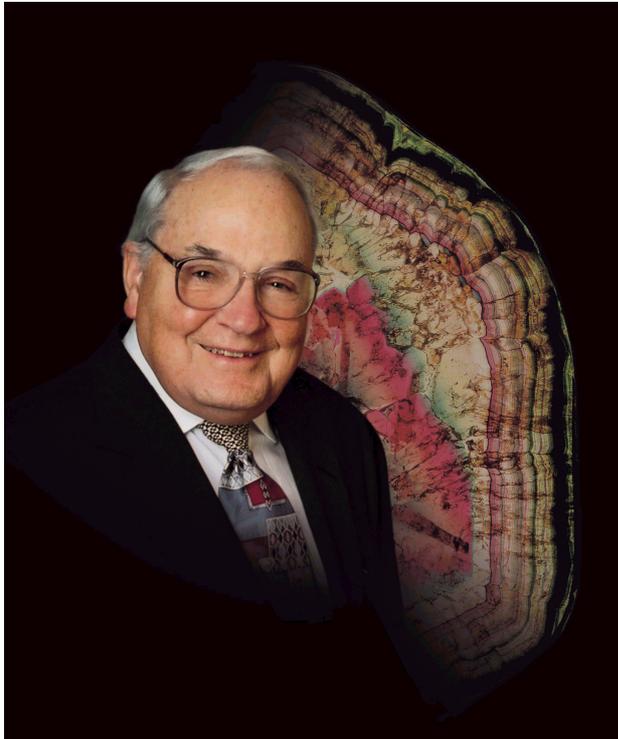
Tableau 1: Les 13 espèces de tourmaline.
(Mandarino, 1999).

L'elbaïte, la dravite, la chromdravite, la liddicoatite, l'uvite et la rossmanite peuvent exister à l'état gemme.

Les tourmalines cuprifère de Paraiba se classent dans les elbaïtes.
(Bahri & Gillot, 1996).

2.2 LA LIDDICOATITE.

La liddicoatite a été identifiée en 1977 par Dunn, Appleman et Nelen et a été nommée en l'honneur du gemmologue américain, Richard Thomas Liddicoat Jr., longtemps président du GIA (Gemological Institute of America).



*Figure 11: M. Richard Thomas Liddicoat (1918-2002).
Il fut président de l'institut gemmologique américain (GIA).
(Photo Gems & Gemology Vol.38 No.1; 2002)*

La liddicoatite de Madagascar a la particularité d'avoir parfois trois bandes formant une étoile et ressemblant au logo Mercedes. On distingue ce « dessin » en observant suivant l'axe C ou axe optique (figure 21).

C'est pour cette raison que les liddicoatites sont généralement coupées et polies en tranche afin de mettre en valeur cette spécificité, mais certaines peuvent être facettées.

On trouve de la liddicoatite dans plusieurs localités à Madagascar : Anjanabonoina, Antaboaka, Jochy, Malakialina, Maroandro, Vohitrakanga. On en a répertorié également au Canada dans le Manitoba, en République Tchèque à Blizna, au Brésil à Minas Gerais, au Congo, au Mozambique à Muiane, au Nigéria à Ogbomoshu et Abuja, en Russie à Malkhan, en Tanzanie à Sanga-Sanga, au Vietnam. (Dirlam & al. 2002).

Il est impossible de distinguer la liddicoatite de l'elbaïte à l'aide de la gemmologie classique car elles ont des propriétés optiques et physiques similaires donc une analyse quantitative de laboratoire sera nécessaire.

2.2.1 PROPRIETES PHYSIQUES

Dans leur analyse en 1977, les auteurs ont trouvé les résultats suivants pour un échantillon de la région d'Antsirabe :

DIMENSIONS DE LA MAILLE (Å°): $a = 15,867 \text{ Å}^\circ$ $c = 7,135 \text{ Å}^\circ$ $z = 3$.

SYSTÈME CRISTALLIN : Rhomboédrique.

CLASSE DE SYMÉTRIE : $3m$ hémimorphie trigonale.

RÉSEAU DE BRAVAIS : Hexagonal Rhomboédrique R.

DURETÉ : 7,5.

DENSITÉ : 3,02.

COULEUR : intrinsèquement incolore, brun, bleu, vert, rose, rouge, jaune, mauve, gris.

ECLAT : vitreux.

CASSURE : conchoïdale.

TRACE : blanche.

2.2.2 PROPRIETES OPTIQUES

UNIAXE NÉGATIF .

INDICE DE RÉFRACTION : $n_e = 1,621$ $n_o = 1,637$.

BIRÉFRINGENCE : 0,016.

FORT PLÉOCHROISME avec $e = \text{brun clair}$ et $o = \text{brun foncé}$.

2.2.3 CHIMIE

	A	B
SiO ₂	37.7	37.50
MgO	0.11	nd
CaO	4.21	3.03
MnO	0.27	2.84
Na ₂ O	0.88	1.27
TiO ₂	0.38	nd
B ₂ O ₃	10.89	10.92
Al ₂ O ₃	37.90	37.99
FeO	0.83	0.09
Li ₂ O	2.48	2.35
F	1.72	nd
H ₂ O ⁺	2.69	3.77
K ₂ O		0.04
TOTAL	100.06	99.80
- O=F	0.72	0.00
TOTAL	99.34	99.80

A : Analyse d'une liddicoatite de la région d'Antsirabe (Dunn & al. , 1977).

B : Echantillon de Anjanabonoina (Madagascar) (Dirlam & al. , 2002).

2.3 L'ELBAÏTE

L'elbaïte a été identifiée en 1913 par Vernadsky. Elle doit son nom à sa localité d'origine, l'île d'Elbe en Toscane (Italie) près du village de San Pietro.

Les cristaux sont essentiellement prismatiques, plus rarement aciculaires, tabulaires, columnaires ou fibreux.

L'elbaïte est un minéral typique des pegmatites granitiques sodolithiques ou elle est associée au microcline, au quartz, à la lépidolite, parfois au béryl et à la topaze.

2.3.1 PROPRIETES PHYSIQUES ET OPTIQUES

DIMENSIONS MOYENNES DE LA MAILLE : $a = 15,810 \text{ \AA}$ $c = 7,085 \text{ \AA}$ $z=3$.

CLASSE DE SYMETRIE : 3m hémimorphie trigonale.

RESEAU DE BRAVAIS : Hexagonal rhomboédrique R.

DURETE : 7.

DENSITE : 3,05 à 3,10.

COULEUR : intrinsèquement incolore, vert, bleu, rouge, jaune, orange, rose, gris.

ECLAT : vitreux.

TRACE : blanche.

CASSURE : irrégulière, conchoïdale.

SIGNE OPTIQUE : Uniaxe négatif.

INDICE DE REFRACTION : $e=1,615-1,630$ $o=1,633-1,651$

FORT PLEOCHROISME.

2.3.2 CHIMIE

	A	B
TiO ₂	0.04	nd
B ₂ O ₃	10.28	10.68
Al ₂ O ₃	43.85	40.82
FeO	0.11	1.11
SiO ₂	37.89	35.74
MnO	0.11	1.99
CaO	0.07	0.59
Li ₂ O	1.66	2.15
Na ₂ O	2.43	2.11
F	0.10	0.11
H ₂ O	3.47	3.10
O=F ₂	0.04	—
-O=F	—	0.05
TOTAL	99.97	98.38

A : Elbaïte de l'île d'Elbe (Italie). Vernadsky (1913).

B : Elbaïte de Manjaka (vallée de la Sahatany) ; (Ranorosa 1986).

2.4 PRESENTATION ET GEMMOLOGIE CLASSIQUE DES ECHANTILLONS ANALYSES.

2.4.1 DESCRIPTION DES ECHANTILLONS.

TABLEAU DES ECHANTILLONS :

Pierre	poids ct	couleur	forme	ind. réfraction	biréfringence	densité	pegmatite
TD01	0,93	jaune	carré	1,621-1,640	-0,019	3,05	Sahatany
TD02	1,10	pourpre	carré	1,622-1,639	-0,017	3,07	Sahatany
TD03	3,40	bleu-gris	octogone	1,630-1,644	-0,014	3,05	Sahatany
TD04	1,74	rouge	rectangle	1,622-1,640	-0,018	3,08	Manjaka
TD05	2,28	rose claire	rectangle	1,621-1,639	-0,018	3,06	Manjaka
TD06	3,95	rose foncé	rectangle	1,623-1,641	-0,018	3,09	Manjaka
TD07	1,81	jaune vert	carré	1,629-1,650	-0,021	3,06	Sahatany
TD08	1,27	vert	carré	1,628-1,642	-0,014	3,05	Sahatany
TD09	1,72	brun vert	carré	1,625-1,642	-0,017	3,06	Sahatany
TD10	0,84	jaune	carré	1,625-1,640	-0,015	3,06	Sahatany
TD11	0,59	bleu	rectangle	1,630-1,647	-0,017	3,05	Sahatany
TD12	2,40	bicolore	brut	1,624 -1,639	-0,015	3,05	Sahatany
TD13	1,52	rose brun	brut	1,623-1,639	-0,016	3,06	Sahatany
TD14	1,14	rose	brut	non mesurable	—	3,07	Manjaka
TD15	5,37	rose	brut	1,628-1,643	-0,015	3,07	Sahatany
TD16	2,75	rouge	brut	1,626-1,644	-0,018	3,06	Sahatany
TD17	3,69	jaune vert	brut	1,622-1,640	-0,018	3,05	Sahatany
TD18	8,85	rose brun	brut	non mesurable	—	3,06	Sahatany
TD19	1,68	vert brun	brut	1,625-1,639	-0,014	3,05	Sahatany
TD20	5,56	rose pale	brut	non mesurable	—	3,06	Sahatany

Tableau 2 : Description des échantillons.

TD04 et TD05 ont été taillées en « taille ciseau », TD07, TD09 et TD10 en « taille coussin », TD02 , TD08 et TD11 en « taille émeraude ».

Les pierres ont été collecté dans la région d'Ibity mais comme il est difficile de connaître la pegmatite exacte de provenance (sauf pour celles précisées), j'ai donc indiqué qu'elles étaient de la vallée de Sahatany (tableau 2).

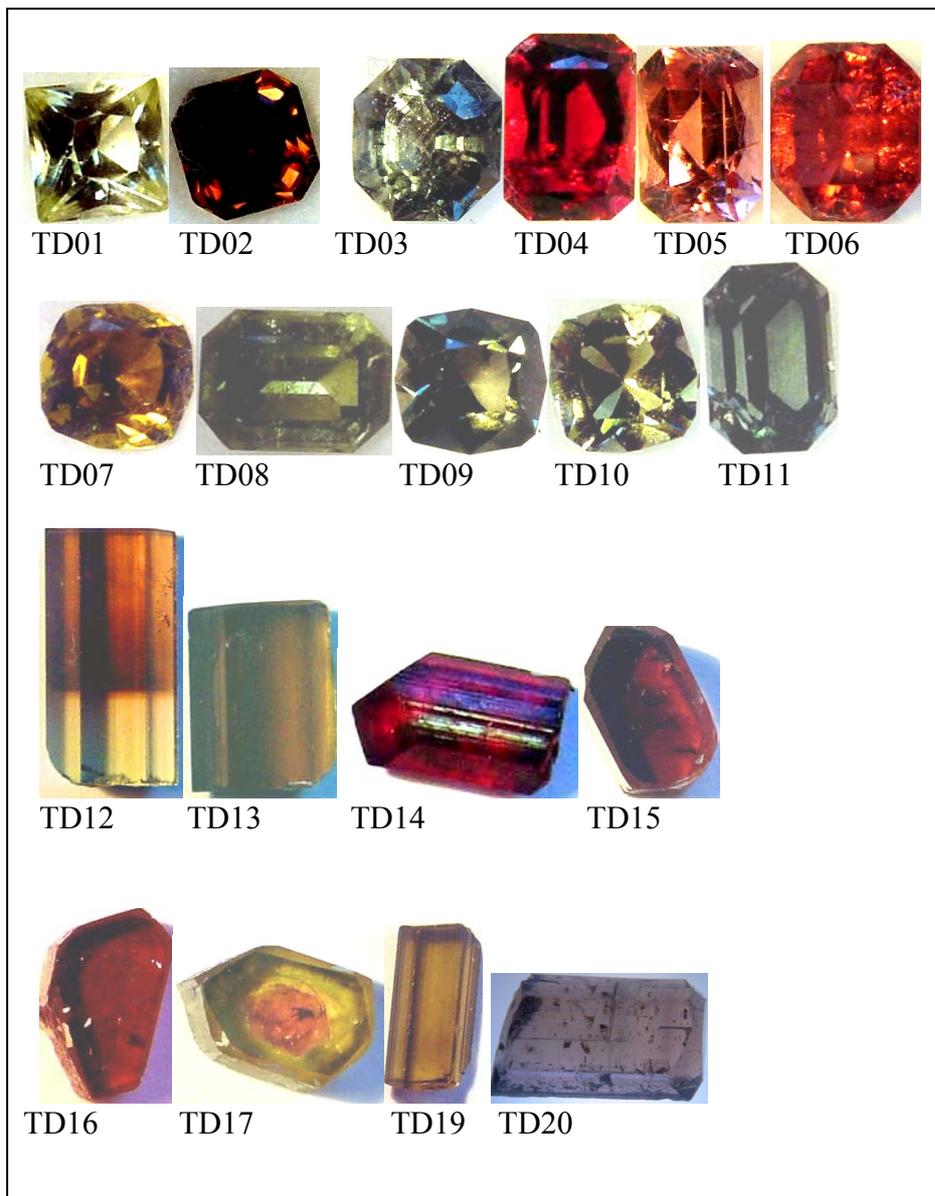


Figure 12: Photos des échantillons analysés (manque TD18).
(photo B.Lasnier)

ETUDE DE GEMMOLOGIE CLASSIQUE:

a. Densité

Le poids spécifique a été mesuré à l'aide de la méthode hydrostatique. La densité varie de 3,05 à 3,09.

b. Indice de réfraction

Les indices de réfraction se situent pour $n_e=1,621-1,639$ et pour $n_o=1,635-1,650$. La biréfringence se situe entre : 0,014 et 0,021.

Ces résultats de densité et d'indice de réfraction sont bien conformes avec ce que l'on trouve généralement dans la littérature.

c. Fluorescence aux UV longs et aux UV courts.

Tous les échantillons sont inertes aux ultraviolets longs et ultraviolets courts.

d. Dichroïsme :

Il existe plusieurs « familles » de couleur dans les échantillons bruts collectés à Ibity. Les couleurs principales que l'on retrouve en majorité sont le rose, le vert et le brun mais des nuances peuvent conduire au jaune ou à un léger bleuté. Le pléochroïsme est plus ou moins fort selon la couleur. En voici la description :

Axe parallèle à c	Axe perpendiculaire à c	pléochroïsme
rose clair	rose foncé	fort
vert brun	teinte foncée	fort
vert pale	vert jaune	moyen
rose clair	violet	fort

Tableau 3 : Description du pléochroïsme. On observe donc quatre familles de couleurs principales.



Figure 13 : Photos de tourmalines brutes du mont Ibity. (photo B.Lasnier).

La gemmologie classique ne nous permet donc pas de distinguer les différentes variétés de tourmaline. Cela confirme ce qui a déjà été trouvé dans des études précédentes.

2.4.2 CRISTALLOGRAPHIE.

A) Morphologie

Dans les échantillons ramenés du champ de la Sahatany, 3 formes principales de cristallisation ont été constatées. En voici les descriptions :

1. Forme « classique » :

Prisme strié bien marqué. Terminaisons cassées aux deux extrémités.

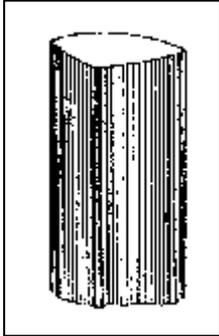


Figure 14 : Cette forme de cristallisation est celle trouvée dans la grande majorité des échantillons. (ex: figure 13)

2. Prismes avec terminaison en « pointe » :

Cristal prismatique avec pour terminaison trois faces du rhomboèdre aigu formant une pointe (ex : TD 14, figure 12)

Cette forme de cristallisation représente environ 5% de l'échantillonnage total.

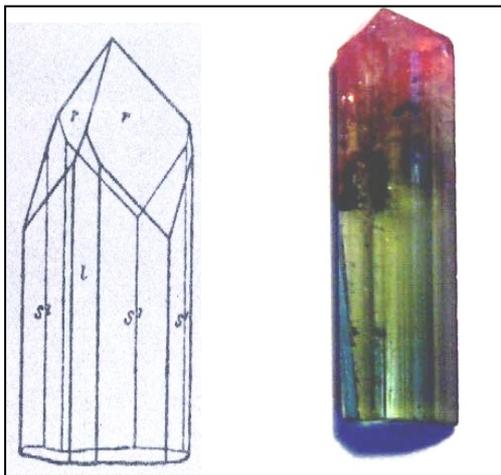


Figure 15 : A gauche, terminaison en pointe, Goldschmidt (1923) d'après un échantillon de Tsilaisina (Vallée de Sahatany ; Madagascar).

A droite, échantillon personnel collecté à Ibity et présentant une terminaison similaire à celle observée sur le dessin (19 x 5 cm).

3. Terminaison en « forme de béryl » :

Prisme à terminaison plate avec parfois des petites faces pyramidales. Cela représente une minorité parmi les échantillons collectés (environ 3%).

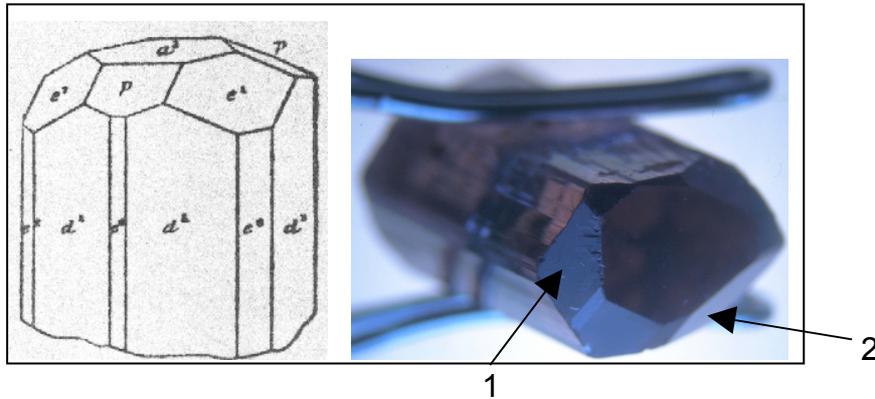


Figure 16 : A gauche, forme « de béryl » d'après Goldschmidt (1923).
A droite, TD20 où l'on distingue parfaitement les faces de terminaison du cristal (flèches 1 et 2). (Photo Fritsch E.).

B) Débit en « nodules gemmes » :



Figure 17 : Echantillon nodule gemme de la Sahatany (9 x 9 cm).
(Photo Lasnier B.).

On peut supposer que durant la cristallisation, le prisme s'est scindé en deux parties. Et durant la séparation s'est formé ce « dôme » dans l'axe perpendiculaire à C. Le changement de texture (lisse sur le dôme) indique une exposition à de forte pressions et températures. (Francis & Kampf 1989). Cette forme particulière représente un faible pourcentage de l'échantillonnage total (environ 5%).

2.4.3 LES ZONATIONS DE COULEUR

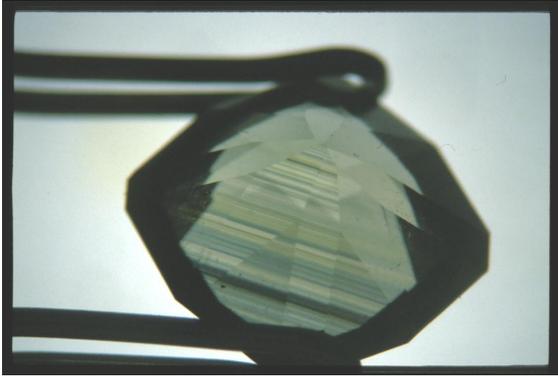


Figure 18 : TD09; On distingue parfaitement les zones de croissance qui font penser à ce que l'on observe pour le saphir. On observe une alternance de zones lamellaires nettes, bleues, jaunes et « incolores ». (photo Fritsch E. grossissement 9 X 3,33).

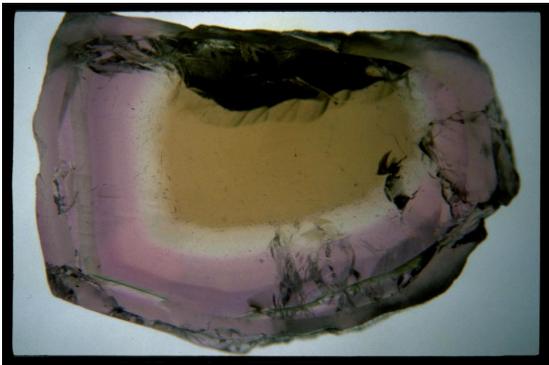


Figure 19 : On distingue au « cœur » de l'échantillon un centre coloré verdâtre puis on va vers une zonation qui va du du rose au violet. Ce spécimen a été poli des deux cotés dans le plan perpendiculaire à C. (14 X 9 cm). (photo Fritsch E. grossissement 9 X 3,33).



Figure 20 : Cet échantillon donne l'impression d'un cristal de tourmaline entouré par un autre. La couleur violacée au centre et le vert en bordure est la zonation la plus fréquente des cristaux de la vallée de Sahatany (inverse de la figure 19) ; Tourmaline « watermelon » avec intérieur rose et extérieur vert. La zone de bordure verte est plus riche en Ca, Fe, Ti et le centre plus riche en Mn. Ce spécimen a été poli des deux cotés dans le plan perpendiculaire à C. (9,5 X 9,5 cm). (photo Fritsch E. grossissement 9 X 3,33).



Figure 21 : Liddicoatite où l'on reconnaît son dessin particulier (triangle plus étoile à trois branches) sur un échantillon de la Sahatany. (photo Fritsch E.) .

2.4.4 LES INCLUSIONS

Les inclusions sont principalement des inclusions fluides sous forme de tubes allongés parallèles entre eux et à l'axe C et des inclusions fluides de formes baroques (trichites).

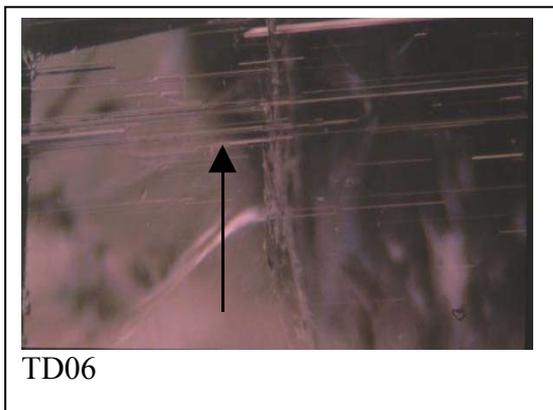


Figure 22: On distingue parfaitement les « tubes » qui sont parallèles et se prolongent dans la longueur du cristal. (photo Fritsch E. grossissement 3 X 3,33) .

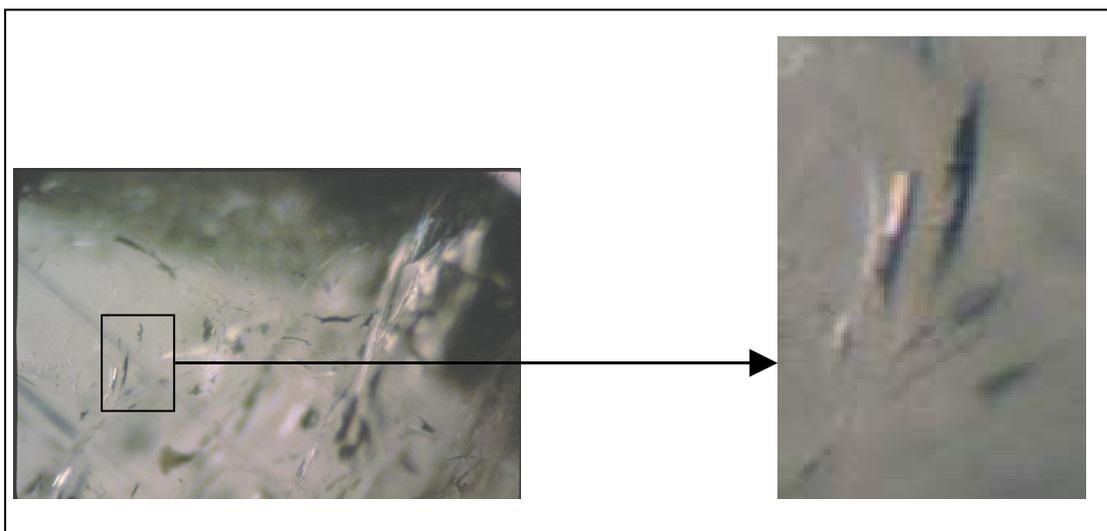


Figure 23: TD06 : Agrandissement de « trichites ». (photo Fritsch E. grossissement 3 X 3,33).

2.4.5 FACETTAGE DES TOURMALINES

L'intensité de la couleur dans les tourmalines se trouve la plupart du temps dans le plan perpendiculaire à C. La couleur est répartie de façon uniforme donc il n'y a pas de problème pour la faire ressortir (pour le saphir ou parfois l'améthyste il faut centrer la zonation de couleur dans la culasse). Mais en tenant compte du critère de poids (si l'on veut garder des pierres qui font au minimum 1 ou 1,5 cts) et pour obtenir la meilleure intensité de couleur, certaines peuvent être facettées dans la longueur du cristal.

C'est le cas pour TD05 et TD08. Si la différence d'intensité de couleur n'est pas très grande dans les deux indices le résultat est satisfaisant : un vert « olive » pour TD08 et un joli rose pour TD05.

TD04 présentait la même intensité dans les deux indices donc le résultat aurait été similaire. En l'occurrence, on obtient une vraie couleur rouge, ce qui est très rare dans les tourmalines.

TD02 et TD07 ont été taillées dans le plan perpendiculaire à C. Dans ces deux cristaux la couleur était plus intense dans ce sens mais aussi plus sombre. J'ai donc réduit l'angle de la culasse pour faire ressortir plus de couleur mais on y perd en lumière réfractée.

CHAPITRE 3 : ANALYSES DE LABORATOIRE

3.1 MESURES EN MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE.

3.1.1 PRINCIPE DU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (MEB).

Cette technique utilise un faisceau d'électrons qui pénètre une très faible épaisseur de la matière sans la détruire. Les échantillons sont recouverts d'un matériau conducteur (or et palladium) qui permet une bonne conduction des électrons. Le faisceau d'électrons incidents, projeté sur la matière cristalline sous vide poussé, affecte la structure électronique et provoque l'émission d'électrons, de photons et de rayons X. On obtiendra électroniquement une image de surface et on l'utilisera afin de déterminer l'analyse chimique de surface.

Pour ces analyses, nous utiliserons le JEOL 5800 du centre de microcaractérisation de l'Université de Nantes.

Les conditions ont été les suivantes: à vide d'air (vacuum), temps d'acquisition : 100 secondes, mesuré entre 0 et 10 keV. Les paramètres du microscope sont restés les mêmes pour toutes les mesures (« accelerating voltage » : 20.00 keV , « takeoff angle » : 37.00 degrés)

3.1.2 MESURES REALISEES.

Les analyses chimiques ont portées sur 20 échantillons (voir tableau 2). Cela nous a permis de distinguer les elbaïtes des liddicoatites en effectuant le rapport Ca /Na. Si ce rapport est supérieur à 1 nous avons affaire à une liddicoatite, s'il est inférieur il s'agira d'une elbaïte. On constate que sur l'échantillonnage sont répertoriées 13 liddicoatites et 9 elbaïtes. Cela représente une proportion de 60% de liddicoatites, ce qui est considérable.

Seuls les éléments détectables sont présentés. Le bore ou le lithium par exemple sont des éléments trop légers pour être détectés avec cette méthode.

Donc pour parvenir à 100%, nous avons pris des valeurs « typiques » de Li_2O , B_2O_3 et H_2O (voir par exemple Dirlam & al. 2002). Certaines sommes sont encore faibles, particulièrement TD02, TD12, TD13. Ces valeurs extrêmement faibles sont probablement dues à une non-perpendicularité entre l'échantillon et le faisceau d'électrons. Les totaux seulement un peu bas peuvent s'expliquer aussi par une sous estimation des éléments légers non mesurables (notamment le Li), ou par une faible concentration en fluor, non mesurée dans nos échantillons.

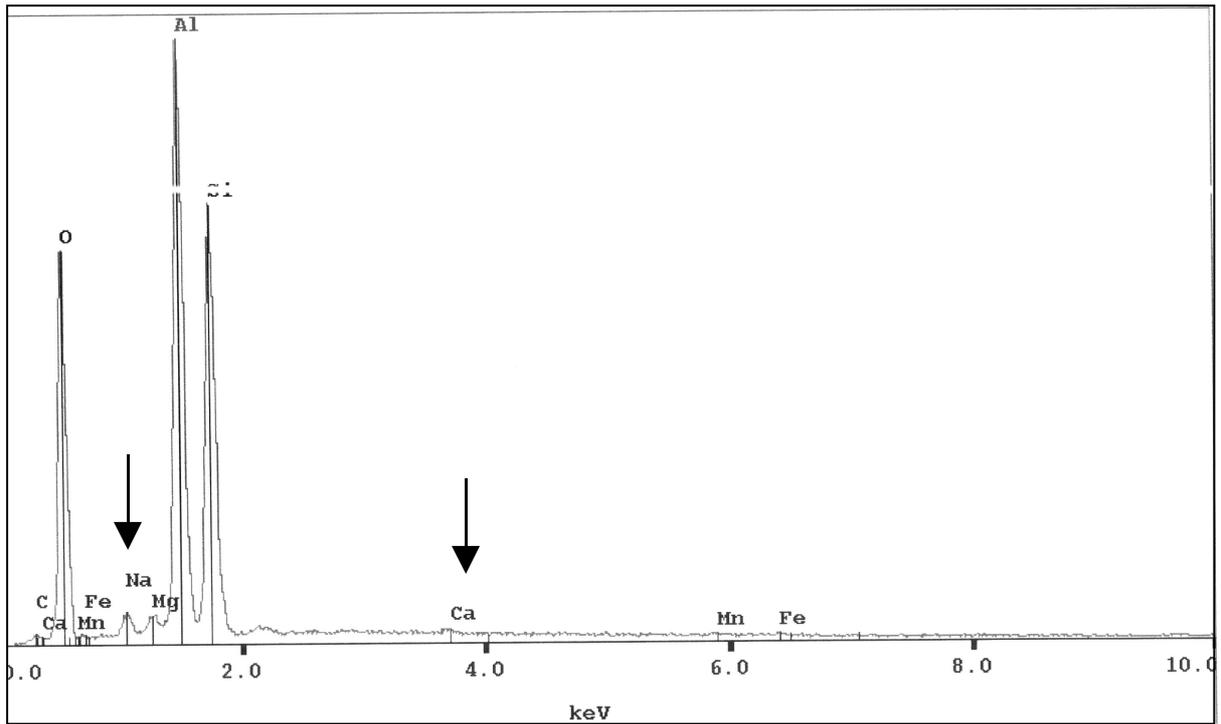


Figure 24: Résultat de l'analyse au MEB pour TD14. Il s'agit d'une elbaïte car la proportion de Na est supérieure à celle de Ca.

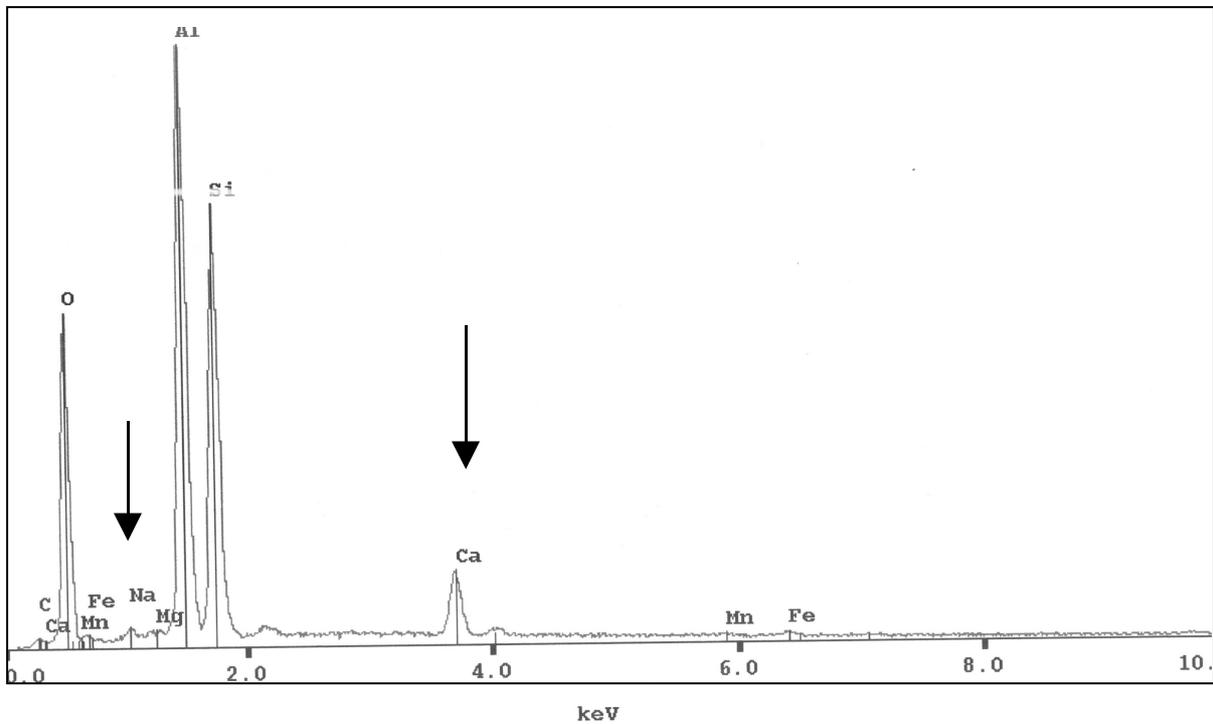


Figure 25: Résultat de l'analyse au MEB pour TD01. C'est une liddicoatite car la proportion de Ca est supérieure à celle de Na.



Composition Chimique	TD01	TD02	TD03	TD04	TD05	TD06	TD07	TD08	TD09	TD10
% oxyde										
Na ₂ O	2.05	1.15	0.67	0.97	1.86	0.36	2.21	0.58	0.22	0.82
Al ₂ O ₃	38.70	36.30	36.88	38.07	38.23	36.11	37.36	37.02	41.40	37.15
SiO ₂	36.92	34.65	37.01	37.71	36.67	37.63	35.19	37.37	42.59	35.92
CaO	0.41	1.40	4.27	2.52	0.15	4.80	0.46	4.72	5.43	3.51
TiO ₂	0.30	0.00	0.00	0.05	0.13	0.00	0.42	0.03	0.00	0.00
MnO	6.84	0.17	0.62	0.23	3.46	0.08	6.53	0.21	0.52	0.22
FeO	0.08	0.02	0.73	0.08	0.14	0.00	0.08	0.68	0.50	0.40
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.08	0.12	0.22	0.12	0.33
Li ₂ O	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62
B ₂ O ₃	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94
H ₂ O	3.13	3.13	3.13	3.13	3.13	3.13	3.13	3.13	3.13	3.13
Total théorique	100.99	89.41	95.87	95.34	96.33	94.84	98.08	96.52	106.47	94.04
% atomique										
Na	1.63	1.02	0.56	0.80	1.54	0.31	1.82	0.48	0.16	0.70
Al	18.69	19.66	18.65	19.16	19.19	18.41	18.69	18.55	18.48	19.11
Si	15.13	15.93	15.88	16.10	15.62	16.28	14.94	15.89	16.13	15.67
Ca	0.18	0.69	1.96	1.15	0.07	2.22	0.21	2.15	2.20	1.64
Mn	2.38	0.07	0.23	0.08	1.25	0.06	2.35	0.07	0.17	0.08
Fe	0.03	0.02	0.26	0.03	0.05	0.00	0.03	0.24	0.16	0.15
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.05	0.07	0.14	0.07	0.22
Ti	0.09	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00	0.13	0.01	0.00	0.00
O	61.88	62.62	62.47	62.65	62.24	62.66	61.75	62.46	62.65	62.44
Total sans bore, lithium ou hydrogène	100.01	100.01	100.01	100.00	100.00	100.00	100.00	99.99	100.02	100.01

Tableau 4: Résultat du MEB.

% oxyde	TD11	TD12j	TD12m	TD13	TD14	TD15	TD16	TD17	TD18	TD19	TD20
Na ₂ O	0.84	0.88	0.94	0.55	2.05	0.63	1.31	0.58	1.19	1.44	1.71
Al ₂ O ₃	37.53	34.14	34.30	27.42	38.85	36.81	36.54	35.73	37.66	35.96	42.10
SiO ₂	36.62	34.53	34.06	27.72	38.85	36.22	35.62	36.00	36.58	38.46	40.90
CaO	4.13	2.46	2.69	3.06	0.21	3.65	1.74	4.03	2.90	2.39	0.50
TiO ₂	0.00	0.07	0.05	0.05	0.10	0.02	0.00	0.00	0.00	0.62	0.00
MnO	0.58	0.03	0.04	0.61	0.19	0.05	0.72	0.39	1.07	0.77	0.04
FeO	1.44	0.06	0.08	1.93	0.22	0.10	0.06	0.60	0.13	3.14	0.00
K ₂ O	0.00	0.01	0.00	0.04	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	0.00	0.00	0.00	0.07	1.23	0.13	0.27	0.05	0.15	2.42	0.00
Li ₂ O	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62	1.62
B ₂ O ₃	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94	10.94
H ₂ O	3.13	3.13	3.13	3.13	3.13	3.13	3.13	3.13	3.13	3.13	3.13
Total théorique	96.83	87.87	87.85	77.14	97.39	93.30	91.97	93.07	95.37	100.89	100.94
% atomique											
Na	0.69	0.80	0.86	0.61	1.64	0.54	1.13	0.50	0.99	1.14	1.31
Al	18.81	18.95	19.07	18.28	18.94	19.07	19.21	18.68	19.06	17.24	19.62
Si	15.58	16.26	16.06	15.68	16.07	15.92	15.88	15.97	15.71	15.65	16.18
Ca	1.88	1.24	1.36	1.86	0.09	1.72	0.83	1.92	1.33	1.04	0.21
Mn	0.21	0.01	0.02	0.29	0.19	0.02	0.27	0.15	0.39	0.27	0.01
Fe	0.51	0.06	0.03	0.91	0.08	0.04	0.02	0.22	0.05	1.07	0.00
K	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.00	0.06	0.76	0.09	0.18	0.03	0.10	1.47	0.00
Ti	0.00	0.02	0.02	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00
O	62.32	62.68	62.60	62.26	62.23	62.60	62.45	62.53	62.37	61.95	62.66
Total sans B, Li ou H.	100.00	100.00	100.02	100.00	100.00	100.01	99.98	100.00	100.00	100.02	99.99

Tableau 5: Résultat de l'analyse au MEB.

Pour différencier l'elbaïte de la liddicoatite, il faut donc un pourcentage de Na supérieur à Ca dans l'elbaïte et de Ca supérieur à Na dans la liddicoatite.

Elbaïte: TD 01-02 -05 -07 - 14 - 16 - 19 - 20

Liddicoatite: TD03- 04 -06 -08 -09 - 10- 11 -12 -13 - 15 -17 - 18

Les tourmalines les plus riches en Mn sont TD01 ,TD05, TD07 (tableau 4). Ces trois pierres sont des elbaïtes; La couleur jaune-verdâtre de TD07 s'explique par un transfert de charge $Mn^{2+} \rightarrow O \rightarrow Ti^{4+}$ (Rossman & Mattson ,1986).

Ce transfert de charge explique aussi la couleur jaune de TD01.

Note : Pour TD12, une analyse sur la partie mauve (m) et sur la partie jaune (j) a été réalisée.

3.2 SPECTROMETRIE UV-VISIBLE-PROCHE INFRAROUGE.

La partie UV-Visible va aider à comprendre l'origine de la couleur dans les échantillons étudiés.

La partie proche infrarouge va permettre de déterminer les vibrations moléculaires dans la structure cristalline.

Les mesures ont été réalisées avec un spectromètre UV VIS PIR CARY 5G et avec pour paramètres :

- Le domaine spectral de 300 à 2500 nm.
- Vitesse : 120 nm /minute.
- Temps de mesure à chaque point : 0,5 seconde.
- Bande passante spectrale :1,0 nm
- Echantillonnage tous les 1 nm.
- Changement de détecteur : 800 nm.

Les échantillons suivants ont été étudiés :

TD04 : Pierre facettée de 5,5 mm d'épaisseur.

Les autres échantillons sont des bruts .

TD12 : Bicolore mauve et jaune dans la direction parallèle à C et rouge dans la direction perpendiculaire à C. L'épaisseur est de 4 mm.

TD13 : Rose brun dans la direction parallèle à C et rose dans la direction perpendiculaire à C. L'épaisseur est de 4,09 mm.

TD14 : Rouge dans les deux directions. L'épaisseur est de 3,55 mm.

TD15 : Rose clair dans la direction parallèle à C et violacé dans la direction perpendiculaire à C. L'épaisseur est de 6,2 mm.

TD16 : Rouge dans les deux directions. L'épaisseur est de 5,21 mm.

TD18 : Rose brun dans la direction parallèle à C et violacé dans la direction perpendiculaire à C. L'épaisseur est de 8,75 mm.

TD20 : Rose pâle dans la direction parallèle à C et violacé dans la direction perpendiculaire à C. L'épaisseur est de 5,1 mm.

Une « marche » à 800 nm, parfois très marquée (TD12 j) est due au changement de détecteur et est très difficile à corriger, car progressive et non reproductible.

Echantillons	Position des pics en nm (E perpendiculaire à C)					Position des pics en nm (E parallèle à C)					Couleur
	Mn ³⁺		H ₂ O			Mn ³⁺		H ₂ O			
TD04	531	—	972	1430	2302	530	714	974	1427	2306	rouge
TD 12(jaune)	—	702	956	1423	2303	—	709	973	1423	2301	jaune
TD 12(mauve)	514	700	—	1428	2301	486	698	971	1421	2303	mauve
TD13	514	690	—	1425	2301	480	700	971	1420	2303	rose brun
TD14	526	732	—	1425	2305	528	728	—	1428	2302	rouge
TD15	515	670	—	1427	2303	479	701	972	1420	2306	rose
Elbaïte											
TD16	519	678	—	1428	2302	506	694	971	1428	2305	rouge
TD18	512	680	975	1429	2297	478	692	970	1420	2300	rose brun
TD20	516	673	—	1425	2203	489	676	971	1422	2299	rose mauve

Tableau 6 : Position des principaux pics.

Pour TD04, avec E perpendiculaire à C, on a un pic plus prononcé autour de 531 nm (fig.25). Cela correspond au pic du Mn³⁺ et explique donc que l'on a une couleur plus rouge quand on observe dans cette direction. Avec E parallèle à C, on a un pic Mn³⁺ situé à 530 nm (fig.26) donc une pierre à peine pléochroïque et cela contribue à lui donner une couleur rouge plus pure.

On retrouve ces mêmes caractéristiques pour TD14 (pic à 528) avec E parallèle à C (tableau 6). Cet échantillon est également faiblement pléochroïque et à un rouge plus pure. TD16, rouge aussi, est peu pléochroïque (pics à 519 et à 506).

On peut aussi observer qu'il n'existe pas de différence majeure entre un spectre de liddicoatite et un spectre d'elbaïte. On peut prendre pour exemples TD13 et TD18 qui ont des pics quasiment similaires (tableau 6).

TD12, lorsqu'on a E perpendiculaire à C, présente un épaulement vers 490 que l'on retrouve dans les tourmalines après irradiation.

Pour la même épaisseur, on a un fort allongement du pic à 1423 nm par rapport à la partie mauve, ce qui prouve une forte présence de H₂O et nous démontre que la partie jaune est environ trois fois plus riche en eau que la partie mauve.

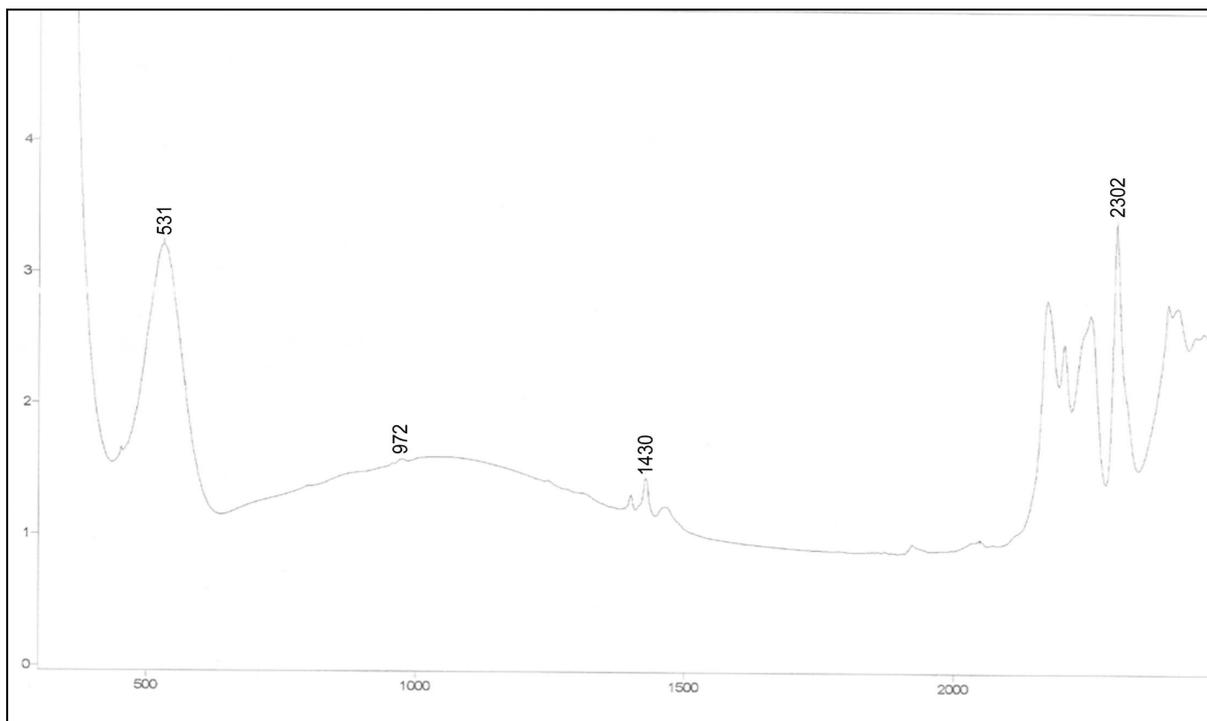


Figure 26: Spectre de TD04 avec le champ électrique E perpendiculaire à C . (liddicoatite)

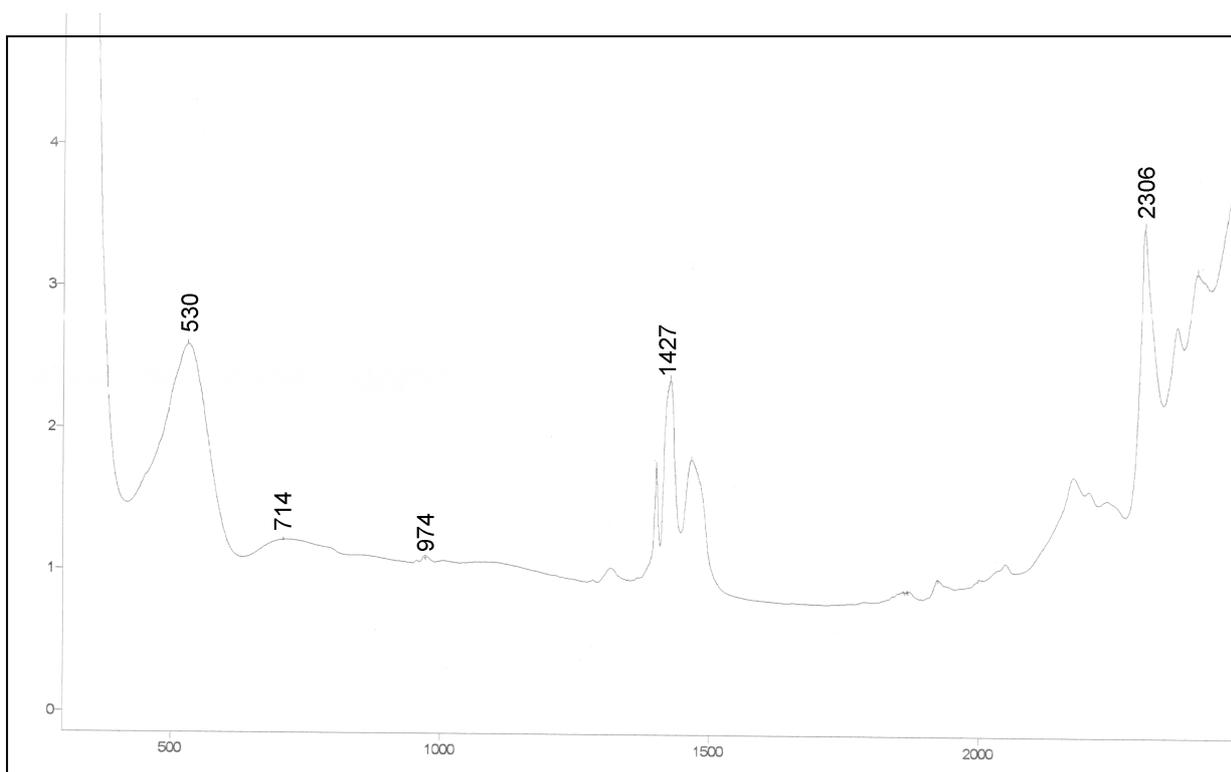


Figure 27 : Spectre de TD04 avec le champ électrique E parallèle à C .



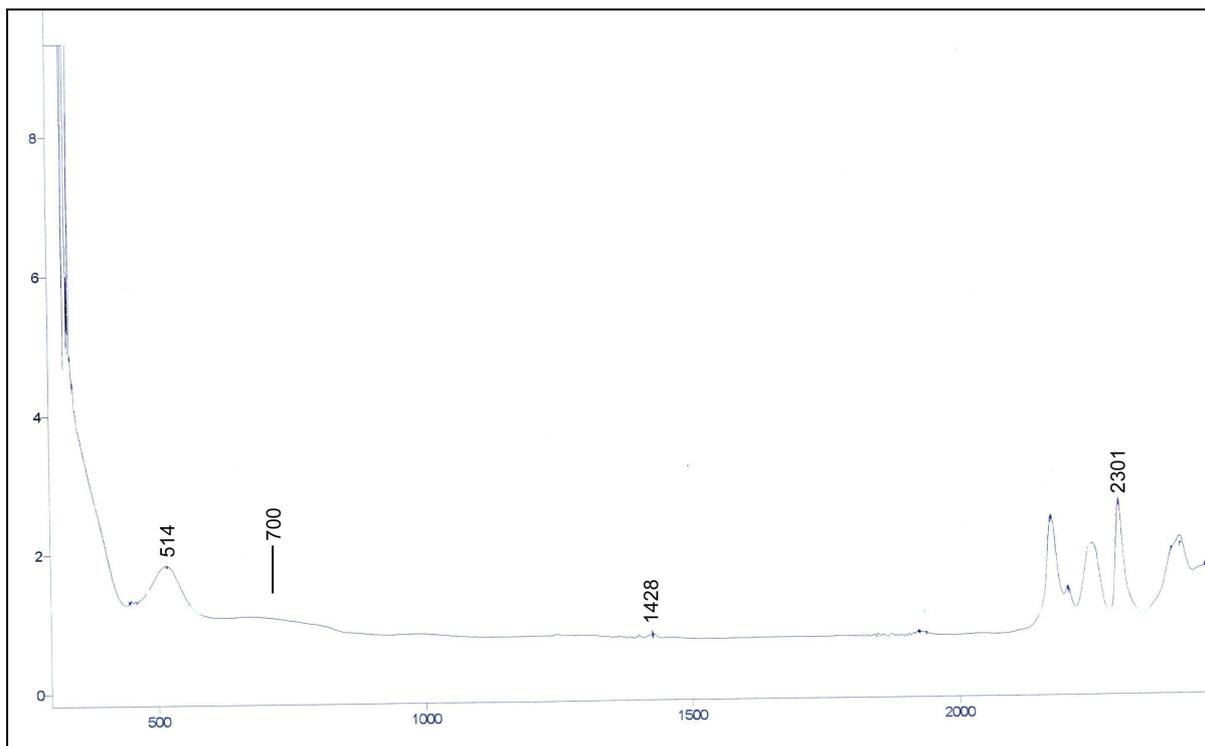


Figure 28: TD12 (partie mauve).E perpendiculaire à C. (liddicoatite)

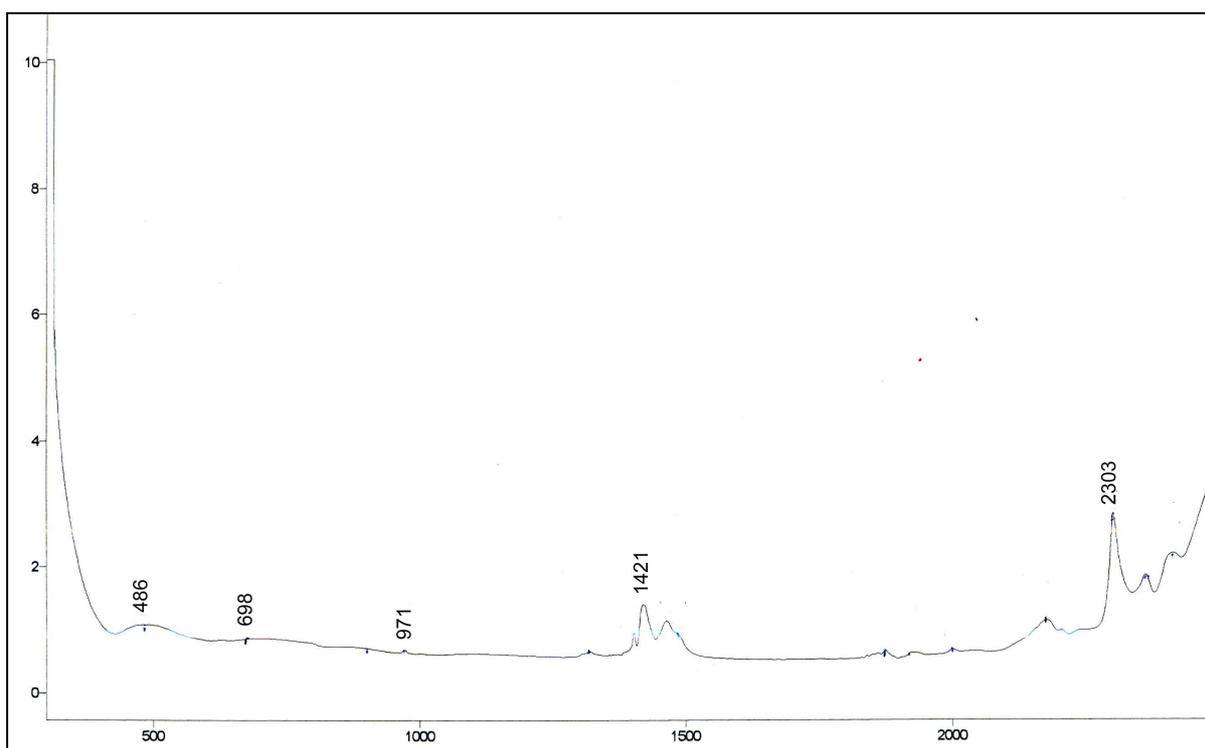


Figure 29: TD12 (Partie mauve) E parallèle à C.



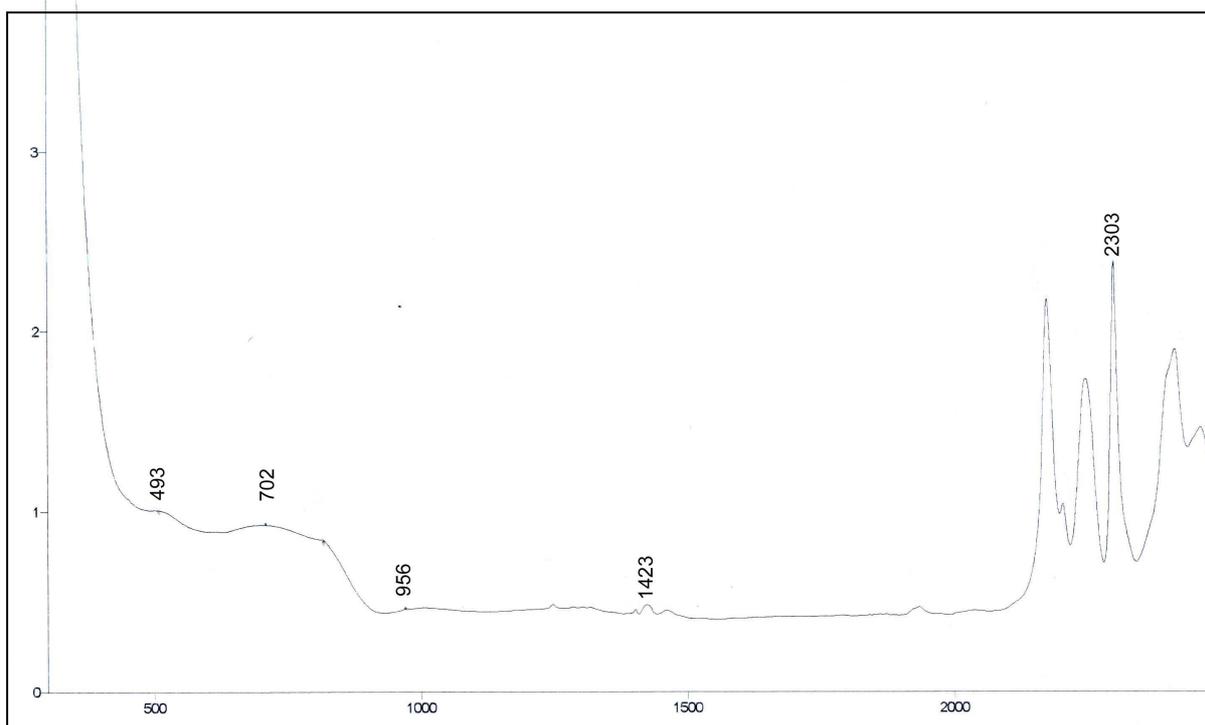


Figure 30: TD12 (Partie jaune) :E perpendiculaire à C.

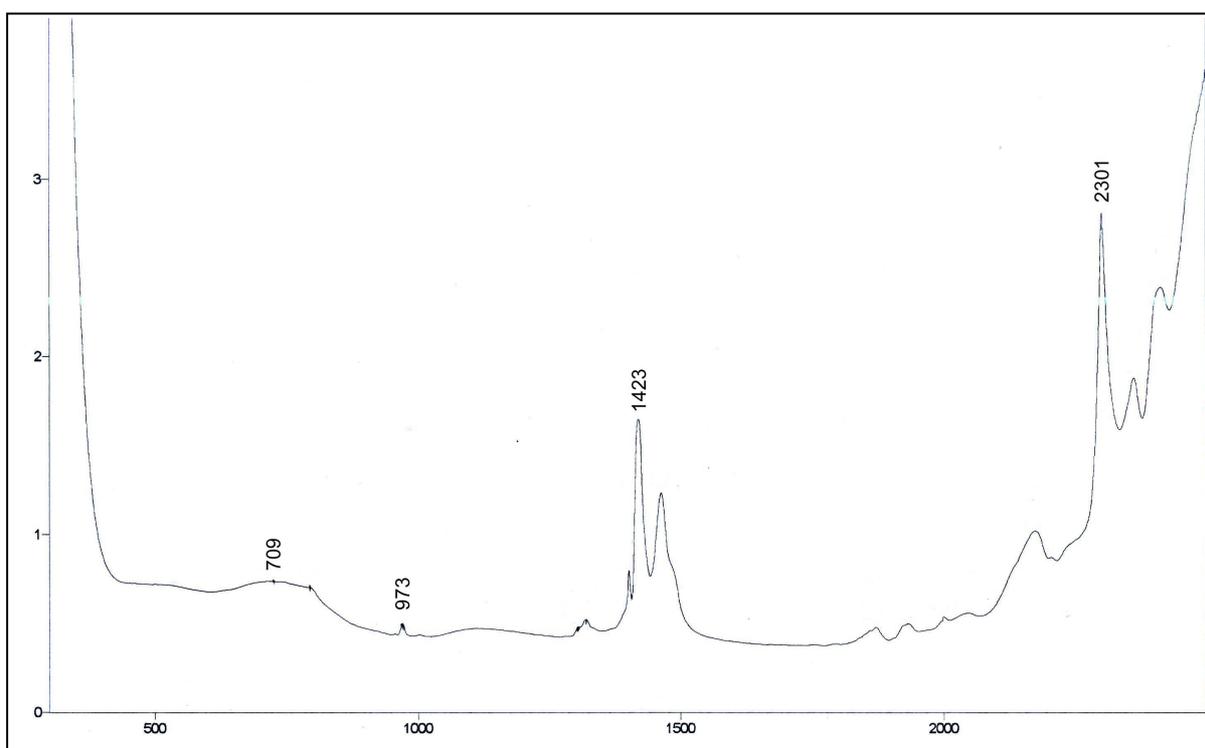


Figure 31: TD12 (Partie jaune) :E parallèle à C.



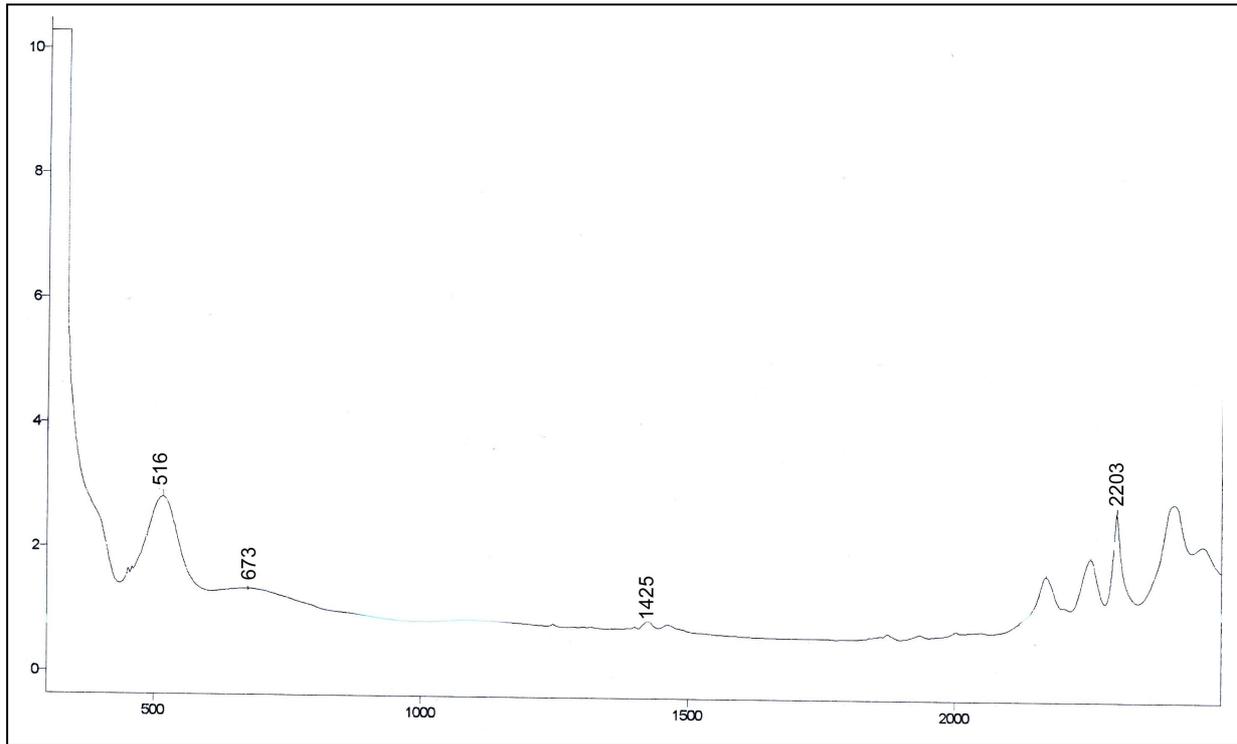


Figure 32: TD20 : E perpendiculaire à C.(Elbaïte)

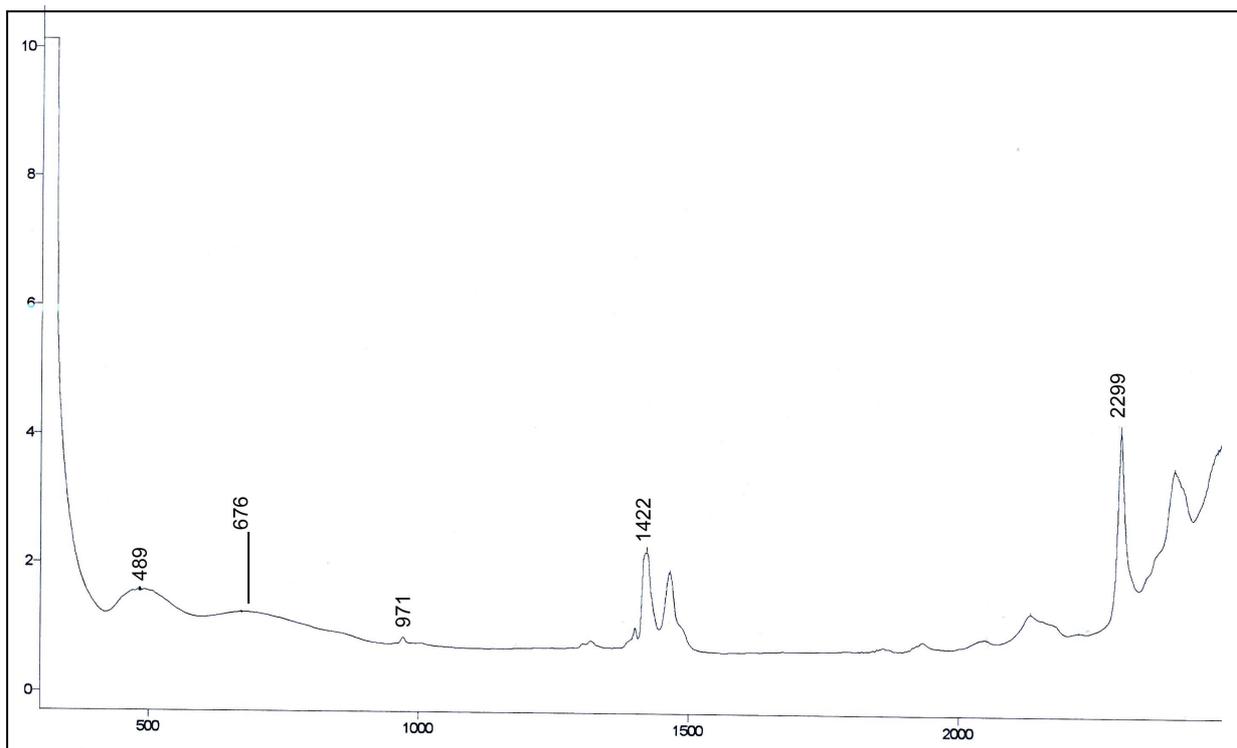


Figure 33: TD20 : E Parallèle à C.



CONCLUSION :

Cette étude nous a permis de montrer que les tourmalines du Mont Ibity sont en grande partie (60% environ) des liddicoatites, une espèce assez rare. Ainsi, elles montrent des morphologies peu courantes (en pointe, en « béryl », en nodules)

Au cours de ce mémoire, j'ai essayé d'étudier les causes qui peuvent expliquer les différences de couleur observées dans les tourmalines provenant de la vallée de la Sahatany. Mais il reste énormément à faire. Par exemple la couleur mauve commune dans la liddicoatite et absente dans l'elbaïte n'est pas encore expliquée.

Nous avons montré que l'origine de la couleur des tourmalines rouges de Manjaka est bien liée au Mn^{3+} , mais la bande d'absorption n'est pratiquement pas dépendante de l'orientation cristallographique ce qui est très surprenant pour une espèce typiquement très pléochroïque comme la tourmaline.

Je conserve dans cette optique des échantillons en vue de travaux complémentaires qui pourraient être réalisés dans le futur par moi-même ou d'autres personnes.

J'ai également essayé de montrer la complémentarité que peut avoir la gemmologie classique avec la gemmologie de laboratoire. Dans le cas bien précis de cette étude, il était indispensable de faire appel à cette dernière car l'elbaïte et la liddicoatite ont beaucoup de similitudes entre elles en gemmologie classique.

Durant mes futurs séjours à Madagascar, je souhaite approfondir mes prospections dans cette région afin d'obtenir un échantillonnage plus précis (notamment sur les pegmatites connues) et la variété la plus large possible de tourmalines gemmes existant à cet endroit.

BIBLIOGRAPHIE

Arem J. (1987). Color Encyclopedia of Gemstones. Van Nostrand Reinholdt, 2nd édition, pp.189-192.

Bahri T., Gillot F. (1996). La tourmaline cuprifère de Sao José Da Bathala province de Paraiba, Brésil. DUG de gemmologie.

Besaigre H. (1966). Gîtes minéraux de Madagascar. Annales géologiques de Madagascar, numéro 34.

Cassedanne J., Le Cleac'h J-M., Lebrun P. (1996). Tourmalines. Hors série Minéraux et fossiles, 75p.

Dietrich R.V. (1985). The Tourmaline group. Van Nostrand Reinholdt, New York, 300 p.

Dirlam D.M., Laurs B.M., Pezzotta F. & Simmons W.B. (2002). Liddicoatite tourmaline from Anjanabonoina, Madagascar. Gems & Gemology vol 38, pp.28-53.

Donnay G., Barton R. (1972). Refinement of the crystal structure of elbaïte and the mechanism of tourmaline solid solutions. Tschermarks. Min.Petr.Mitt 18, pp.273-286.

Dunn P.J., Appleman D.E., Nelen J.E. (1977). Liddicoatite, a new calcium end member of the tourmaline group. American Mineralogist, vol 62, pp.1121-1124.

Flahaut J. Picon M. (1957). Eléments de minéralogie et cristallographie. Sedes, Paris, 293 p.

Foït F.F., Rosenberg P.E. (1979). The structure of vanadium –bearing tourmaline and its implication regarding tourmaline solid solutions. American Mineralogist, vol 64, pp.788-798.

Francis C.A., Kampf A.R. (1989). Béryl gem nodules from the Bananal mine, Minas Gerais, Brazil. Gems & Gemology, vol.25 No.1., pp.25-29.

Fritsch E., Rossman G.R. (2001). L' origine de la couleur dans les gemmes. Revue de gemmologie AFG, 140, pp.36-43.

Goldschmidt V. (1923). Atlas der Krystallformen. Rochester Mineralogical Symposium vol IX, p.26.

Hlava P.F. (2001). Gem News International: A bismuth-bearing liddicoatite from Nigeria. Gems & Gemology, vol.34, No.2, pp.152-153.

Jarny A. (1990). Excursion à Madagascar. Revue de gemmologie AFG, No.140, pp.36-43.

Koivula J.I., Kammerling R.C. (1990). Gem news : Largest known faceted liddicoatite tourmaline reportedly found in Brazil. *Gems & Gemology*, vol.26, No.1, p.108.

Lacroix A. (1922). *Minéralogie de Madagascar*. Augustin Challamen, Paris, vol 1, pages consultées : 22, 41, 152, 205, 357, 406, 420, 433, 436, 460, 492.

Lacroix A. (1922). *Minéralogie de Madagascar*. Augustin Challamen, Paris, vol 2, pages consultées : 90, 116, 175, 279, 287, 327, 487, 530, 540, 542, 545.

Mandarino J.A. (1999). *Fleischer's Glossary of Mineral Species 1999*, eighth edition. The Mineralogical Record Inc, Tucson, pp.220-221.

Mattson S.M., Rossman G.R. (1986). Yellow Mn-rich elbaïte with Mn-Ti intervalence charge transfer. *American Mineralogist*, vol.71, pp.599-602.

Mizuhiko A., Takahiro K., Toshiro N., Arashi K. (2001). Triclinic liddicoatite and elbaïte in growth sectors of tourmaline from Madagascar. *American Mineralogist*, vol 86, pp.364-369.

Ngu N.G. (2001). Some characteristics of tourmaline in Vietnam. *Proceedings of the international workshop on material characterization by solid state spectroscopy. Gems and minerals of Vietnam*, Hanoi, april 4-10, pp.265-274.

Novak M., Selway J.B., Cerny P., Hawthorne F.C., Ottolini L. (1999). Tourmaline of the elbaïte-dravite series from an elbaïte subtype pegmatite at Blizna, southern Bohemia, Czech Republic. *European Journal of Mineralogy*, vol.11, pp.557-568.

Ranorofoa N. (1986). *Etude minéralogique des pegmatites du champ de la Sahatany*. Thèse de doctorat de l'université Paul Sabatier, Toulouse, pp.6-64.

Sahama Th.G., Von Knorring O., Tornroos R. (1979). On tourmaline. *Lithos*, vol.12, pp.109-114.

Teertstra D.K., Cerny P., Ottolini L. (1999). Stranger in paradise: Liddicoatite from the high grade dike pegmatite, south-eastern Manitoba, Canada. *European Journal of Mineralogy*, vol.11, pp.227-235.

Vernadsky V.I. (1913). Über die chemische Formel der Tourmaline. *Zeits Krist.*, 53, pp.273-288

Zagorovsky V.E., Peretyazhko I.S., Schiryevna V.A., Bogdanova L.A. (1989). Tourmalines from miarolitic pegmatites in the Malkhan Range (Transbaikalia). *Mineralogicheskii Zhurnal*, vol.11, No.5, pp.44-55.

Zang J. (1994). Madagascar's neue konkurrenz: Zonierte Turmaline aus Sanga-Sanga, Tanzania. *Extralapis No.6*, Turmalin, pp.40-43.