

Etude gemmologique et minéralogique de la tourmaline

Diplôme Universitaire de Gemmologie de
Lyon (DUGEM)

SAMUEL BARBIER

Année 2014 / 2015



Photo 1 : Quelques tourmalines analysées durant ce diplôme.

TABLE DES MATIERES

Introduction	4
I Généralités sur la tourmaline	5
Principales caractéristiques historiques, physiques et chimiques	5
Structure atomique.....	7
Classification et nomenclature.....	8
Minéralogique.....	8
Appellations commerciales et tarifications	10
Appellations communes	10
Tarifications.....	12
II Géologie de la tourmaline	13
Les gisements d'origine Magmatique	14
Les gisements d'origine Hydrothermal	14
Les gisements d'origine Métamorphique	15
Les gisements d'origine Sédimentaire	15
III Echantillons étudiés	17
IV Techniques de caractérisations et résultats bruts	20
Analyse gemmologique par techniques standard	20
Densité	20
Inclusion	21
Réfractométrie.....	23
Analyse gemmologique par techniques de laboratoire	24
Microspectromètre Raman	25
Absorption.....	26
Résultats de référence	26
Résultats d'autres tourmalines	32
Résultats des lames minces	41
Analyse géochimique par techniques de laboratoire	45
Microscope électronique à balayage (MEB)	45
Microsonde électronique	45
V Interprétations et discussion	50
VI Conclusion générale.....	51
Bibliographie.....	52

INTRODUCTION

L'une des familles minérale la plus présente dans la croûte continentale est sans aucun doute la tourmaline. Connue depuis plusieurs millénaires, les usages de celles-ci sont extrêmement variés. Ils vont des fonctions des sous-marins (piézoélectricité), en passant par le récupérateur de cendres (pyroélectricité), et en allant jusqu'aux pierres taillées ornementant les parures, sans oublier ses intérêts pour la science et les collections minéralogiques. Malgré mes études en géologie, j'ai longtemps pensé qu'elle n'était présente qu'en une seule couleur, le noir, la couleur de l'espèce schörl. Une idée que se font d'ailleurs beaucoup de personnes.

J'ai ensuite découvert les couleurs communes aux tourmalines comme le rose, le vert, la melon d'eau... (Voir photo 1). C'est donc très intéressé que j'ai commencé à l'étudier durant un premier stage de laboratoire à l'UCBL. Le but de celui-ci était de réaliser des lames minces de tourmalines, noire pour la plupart, pour mettre en place un TP-TD destiné à des étudiants de niveau licence 2 ou master. C'est ainsi que j'ai découvert la grande variété de coloration que pouvait posséder cette famille minérale « arc-en-ciel ». Lorsque j'ai pu m'inscrire au DUGEM, le choix du sujet était donc tout trouvé : La tourmaline. Cependant quelle étude réaliser sur celle-ci ? **Les espèces de tourmaline sont actuellement classifiées suivant leurs formules chimiques par des analyses essentiellement destructives, l'intérêt était donc de tenter d'observer ces espèces par des analyses de laboratoire classique et gemmologique non destructives.** Si cela était possible. L'intérêt était donc double : **Permettre de conserver intact les gemmes et ajouter un set de données utilisables pour caractériser des tourmalines, mais aussi de connaître son espèce et éventuellement une potentielle provenance.** La multiplication des analyses permettant d'avoir des données robustes pour émettre un avis sur une gemme. **J'ai donc cherché à caractériser ces tourmalines et si elles pouvaient être différenciées à partir d'un ou plusieurs éléments facilement identifiables (set de données de références des caractéristiques des tourmalines).** L'idée étant de savoir si on pouvait clairement identifier les différentes espèces de tourmaline, et si oui avec quel(s) instruments non destructifs de gemmologie classique ou de laboratoire.

Je trouvais ces questions particulièrement pertinentes, le sujet n'ayant jamais été clairement étudié jusqu'alors. Proposer une possible classification des tourmalines par des méthodes non destructives, présente un intérêt pour le monde de la gemmologie avec par exemple la possibilité d'établir une meilleure tarification des tourmalines.

C'est donc sur ces questionnements que j'ai pu avancer progressivement et construire mon raisonnement. Ainsi ce présent rapport explique le raisonnement que j'ai suivi, les axes d'études choisis, les données récoltées et les conclusions que l'on peut en déduire.

I GENERALITES SUR LA TOURMALINE

Connue et étudiée depuis le 18^{ème} siècle en Europe notamment par Buffon, la tourmaline a fascinée rapidement les scientifiques par ses capacités à attirer ou éloigner la poussière ainsi que les éléments légers si celle-ci était chauffée. **Ce phénomène appelé piézoélectricité** a été publié pour la première fois par l'allemand Aepinus en 1756 (abstract de Harvard College Library sur la lettre de Benjamin Franklin à William Heberden, 7 Juin 1759 [1]). **Ce n'est qu'au 19^{ème} siècle que la tourmaline trouve sa place dans la bijouterie.** Depuis on estime que de nombreux saphirs et rubis royaux seraient en réalité des tourmalines. Aujourd'hui elle est très connue du grand public et ses tarifs continuent d'augmenter notamment grâce à la récente découverte de la tourmaline Paraíba ainsi que la popularité des variétés indicolite, rubellite, melon d'eau,...qui sont très attractives par leurs couleurs et spécificités très variées et spécifiques aux tourmalines.

PRINCIPALES CARACTERISTIQUES HISTORIQUES, PHYSIQUES ET CHIMIQUES

Son nom vient de තුරමලි « turamali » en Cingalais (Sri Lanka).

Famille : silicates, sous famille des **cyclosilicates**

Système cristallin : Rhomboédrique (trigonal)

Groupe d'espace : R3M

Dimension de la maille : a= 15.84-16.03 c=7.10-7.25 Å Z=3 [2]

Varie suivant sa composition.

Formule chimique : (X)(Y)₃(Z)₆B₃Si₆O₂₇(W)₄

Avec : X = Na, Ca, parfois K ou lacune □

Y = Al, Li, Fe²⁺, Fe³⁺, Mg²⁺, Parfois Mn³⁺ Octaèdre (coordenance 6)

Z = Al³⁺, Fe³⁺, Cr³⁺, parfois Mg²⁺ et V³⁺ Octaèdre (coordenance 6) D'après Dietrich 1985 [3]

W = O-, OH-, F-

Forme des séries continues ou solution solide : elbaïte- dravite, elbaïte-schörl-liddicoatite

Dureté : 7-7.5

Densité : 3.02-3.26

Effet physique ou chimique : Piézoélectrique et pyroélectrique

Magnétisme : Aucun.

Radioactivité : Aucune.

Solubilité : Insoluble aux acides

Habitus : Cristaux en baguettes ou aiguilles allongées ou massifs, striés parfois radiants. Roche massive et granulaire. On peut aussi la retrouver en associations de plusieurs cristaux orientés dans le même axe (fibreux). Ses cristaux peuvent être de taille infra millimétrique à pluri métrique. (Tableau 1, figure 4)

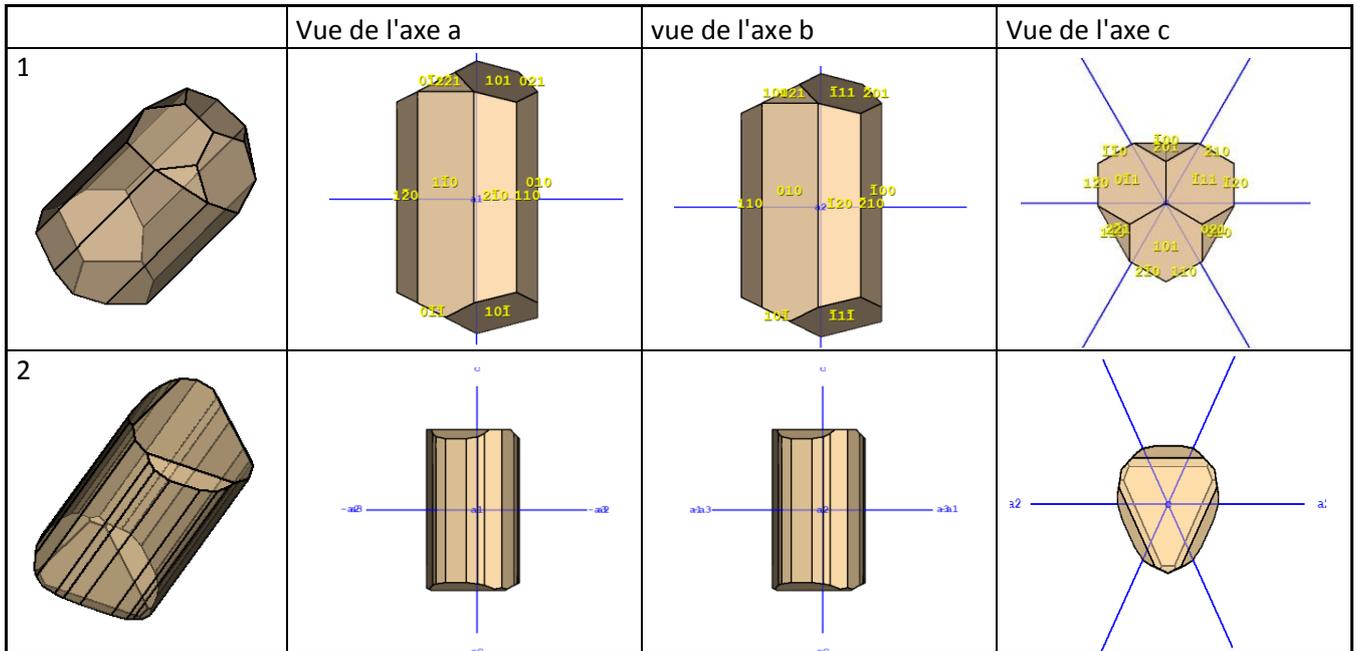


Tableau 1 : Exemple de 2 cristaux typiques de tourmaline vus suivant les différents axes a, b et c. La tourmaline 1 vient de Madagascar, la tourmaline 2 vient de San Diégo en Californie. Réalisés par Smorf.nl, visualisation 3D avec rotations, notations des axes,... disponibles sur http://www.smorf.nl/index.php?crystal=Tourmaline_004 et www.smorf.nl/?crystal=Tourmaline_309.

Couleurs : Toutes les couleurs possibles, parfois plusieurs dans un seul minéral (melon d'eau, ...)

Trace : Blanc

Eclat : Vitreux

Pléochroïsme : Généralement fort mais variable

Cassure et clivage : Clivage indiscernable, cassure irrégulière voir légèrement conchoïdale. Reste très fragile

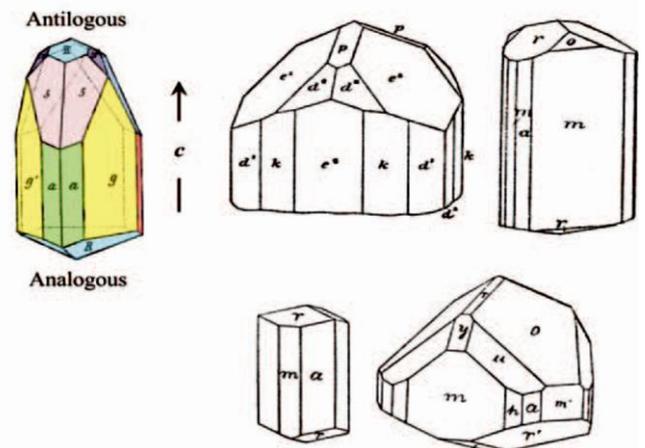


Figure 1 : Habitus et forme morphologique classique de la tourmaline d'après Goldschmidt 1922 (modifié par Hawsthorne et al 2011 [4]).

STRUCTURE ATOMIQUE

La structure atomique de la tourmaline est très complexe. **Il s'agit d'un silicate complexe de Bore et plus précisément d'un cyclosilicate.** Sa structure est composée d'anneaux (Si_6O_{18}) formés par des tétraèdres (SiO_4) et un triangle BO_3 . Ces différents éléments de la structure sont liés entre eux par des octaèdres ($\text{YO}_4(\text{OH}_2)$) ayant une symétrie d'ordre 3. Ces anneaux sont liés entre eux latéralement par une symétrie d'ordre 6 grâce à six autres octaèdres déformés ($\text{ZO}_5(\text{OH})$), (Figure 2, 3, 4 et 5). Ce qui change finalement entre chacune de ces espèces, ce sont les éléments à la place de X, Y et Z. Pour les trois exemples on a X= Na pour la dravite et l'elbaïte, Ca pour la F-liddicoatite. Y= Mg_3 pour la dravite, $\text{Li}_{1.5}\text{Al}_{1.5}$ pour l'elbaïte, et Li_2Al pour la F-liddicoatite. Z= Al_6 pour la dravite et l'elbaïte et la F-liddicoatite et W=F pour la F-liddicoatite(Figure2-5 et tableau 2). De manière générale X= Na, Ca,□ ; Y= Mg, Al, Li, Cr, Fe ; Z= Al, Cr, V, Fe, Mg ; V=OH, O ; W= OH,F.

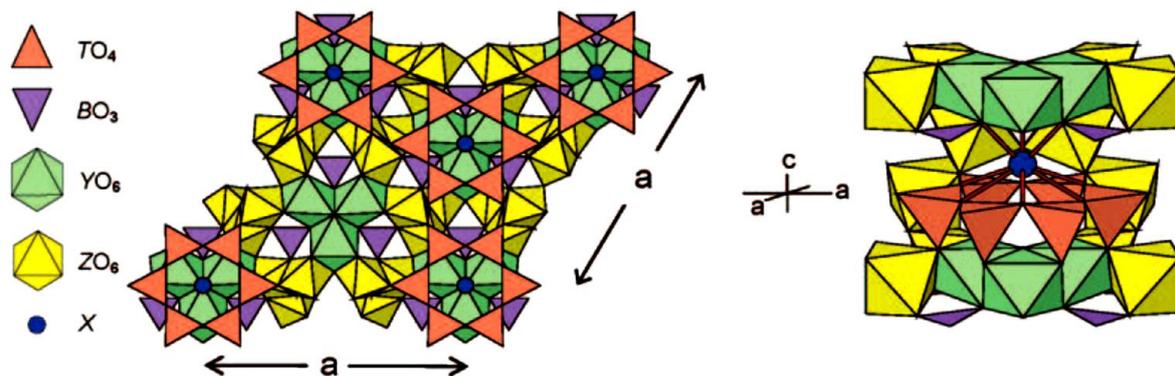


Figure 2: Structure de la tourmaline avec une vue de dessus (axe c) et une vue latérale (perpendiculaire à c (vue oblique)). On peut voir deux triangles TO_4 et BO_3 , des octaèdres YO_6 et des octaèdres déformés ZO_6 . On voit aussi la position du site X. D'après Hawthorne et al (2011) [4]

Exemple de structure:

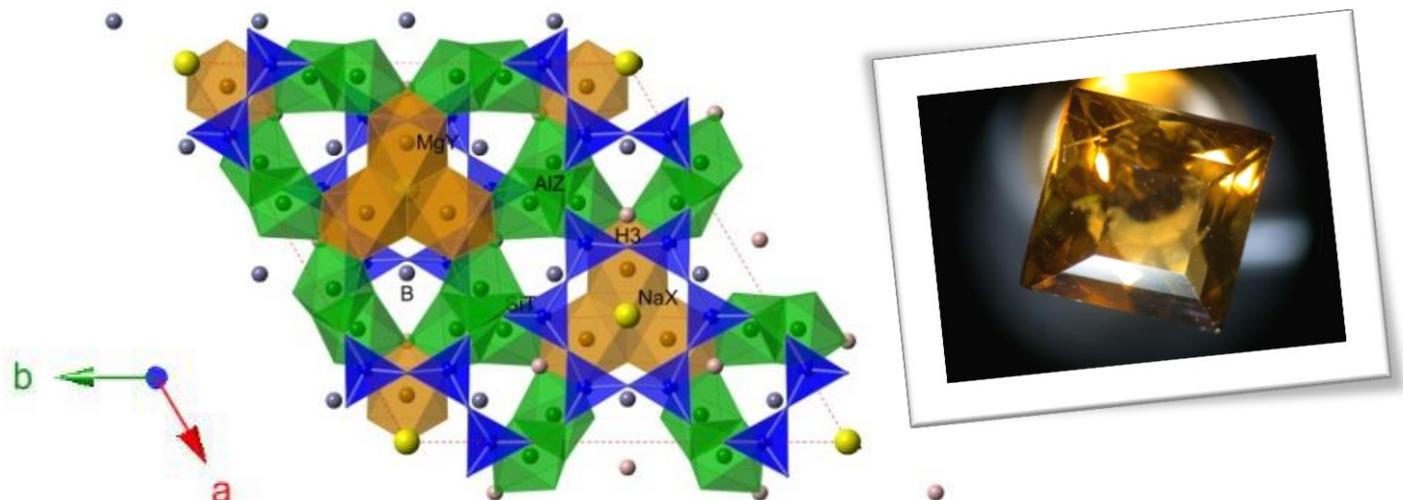


Figure 3 : Structure et photo d'une dravite. On retrouve ainsi les tétraèdres bleus de SiO_3 formant un anneau, les octaèdres ayant pour Y le Mg, et les octaèdres déformés ayant pour Z l'Al. Les atomes bleus sont le Bore, atomes jaunes (X) le sodium, et les atomes roses clairs(V) l'hélium (groupement OH) (tableau 2).

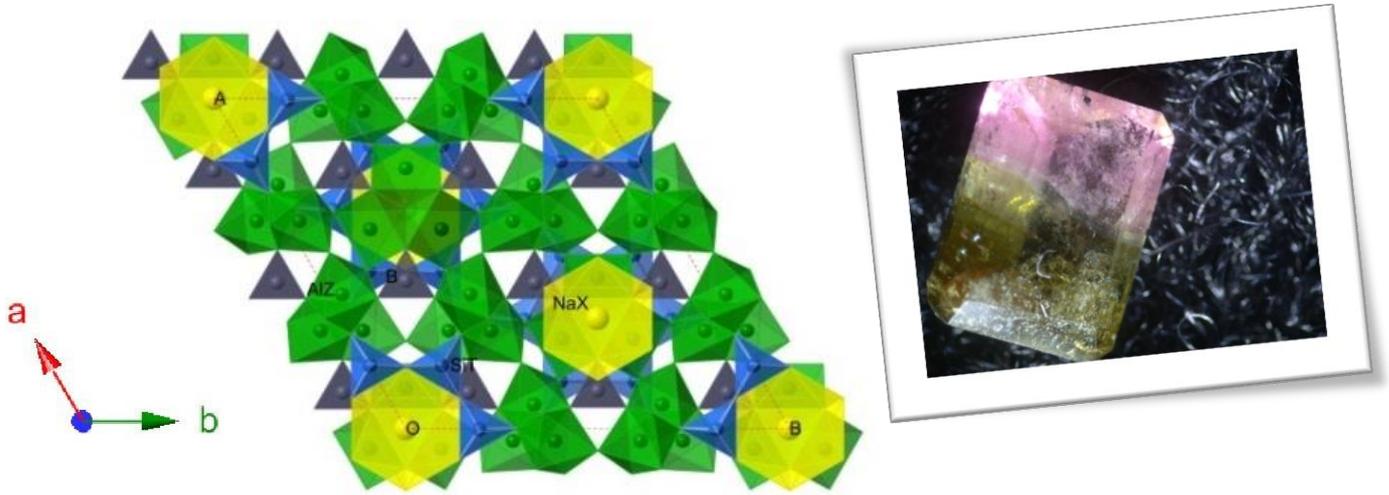


Figure 4 : Structure et photo d'une elbaïte. On retrouve ainsi les tétraèdres bleus de SiO_3 formant un anneau, les octaèdres (non dessinés ici) ayant pour Y le Li ou Al, et les octaèdres déformés verts ayant pour Z l'Al. Les atomes gris sont le Bore, atomes jaunes (X) le sodium, non présent ici les groupements OH (V) (tableau 2).

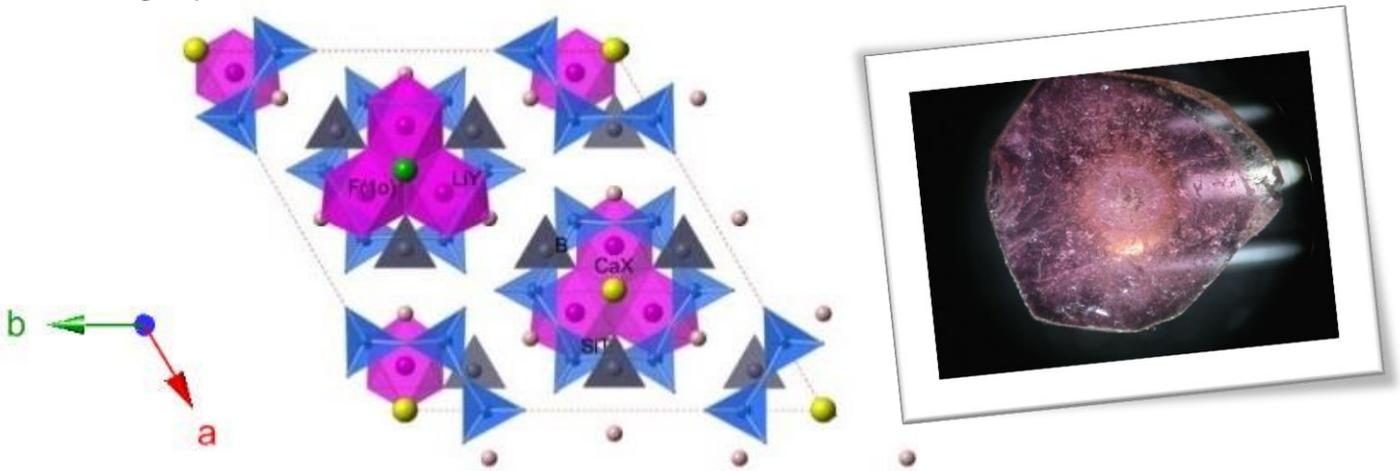


Figure 5 : Structure et photo d'une liddicoatite. On retrouve ainsi les tétraèdres bleus de SiO_3 formant un anneau, les octaèdres ayant pour Y le Li ou Al, et les octaèdres déformés (non dessinés ici) ayant pour Z l'Al. Les atomes gris sont le Bore, atomes jaunes (X) le calcium, atome vert le fluor, et les atomes roses (V) l'hélium (groupement OH) (tableau 2).

CLASSIFICATION ET NOMENCLATURE

MINERALOGIQUE

Principaux groupes (figure 6 et tableau 2) :

Groupe **calcique** : (elbaïte, schörl, dravite,...)

Groupe **alcalin** : (liddicoatite, uvite,...)

Groupe à **lacune(s)** : (rossmanite, foitite,...)

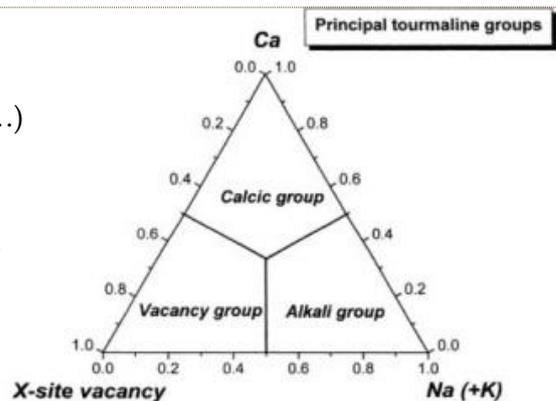


Figure 6 : Principaux groupes de tourmaline, classification générale, figure modifiée d'après Henry et al 1999 [5].

Subdivision par anion placé en site W (figures 7 et 8) :

Subdivision par le fluor : (liddicoatite, uvite, buergerite)

Subdivision par un groupement hydroxyle : (elbaïte, schörl, dravite, rossmanite, hydroxy-feruvite...)

Subdivision par un anion oxygène : (povondraïte)

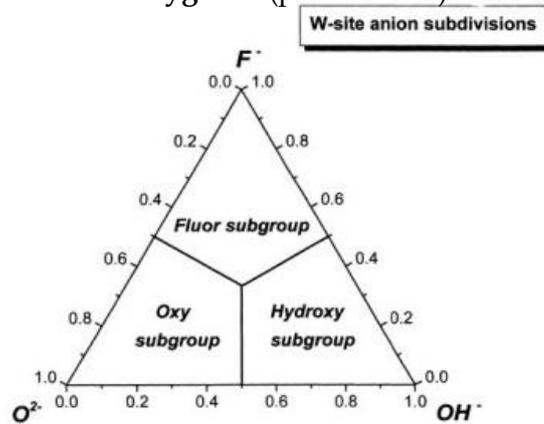


Figure 7 : Subdivision suivant les anions placés sur le site W, classification générale figure modifiée d'après Henry et al 1999 [5]

Primary Tourmaline Groups

General Tourmaline Species W site

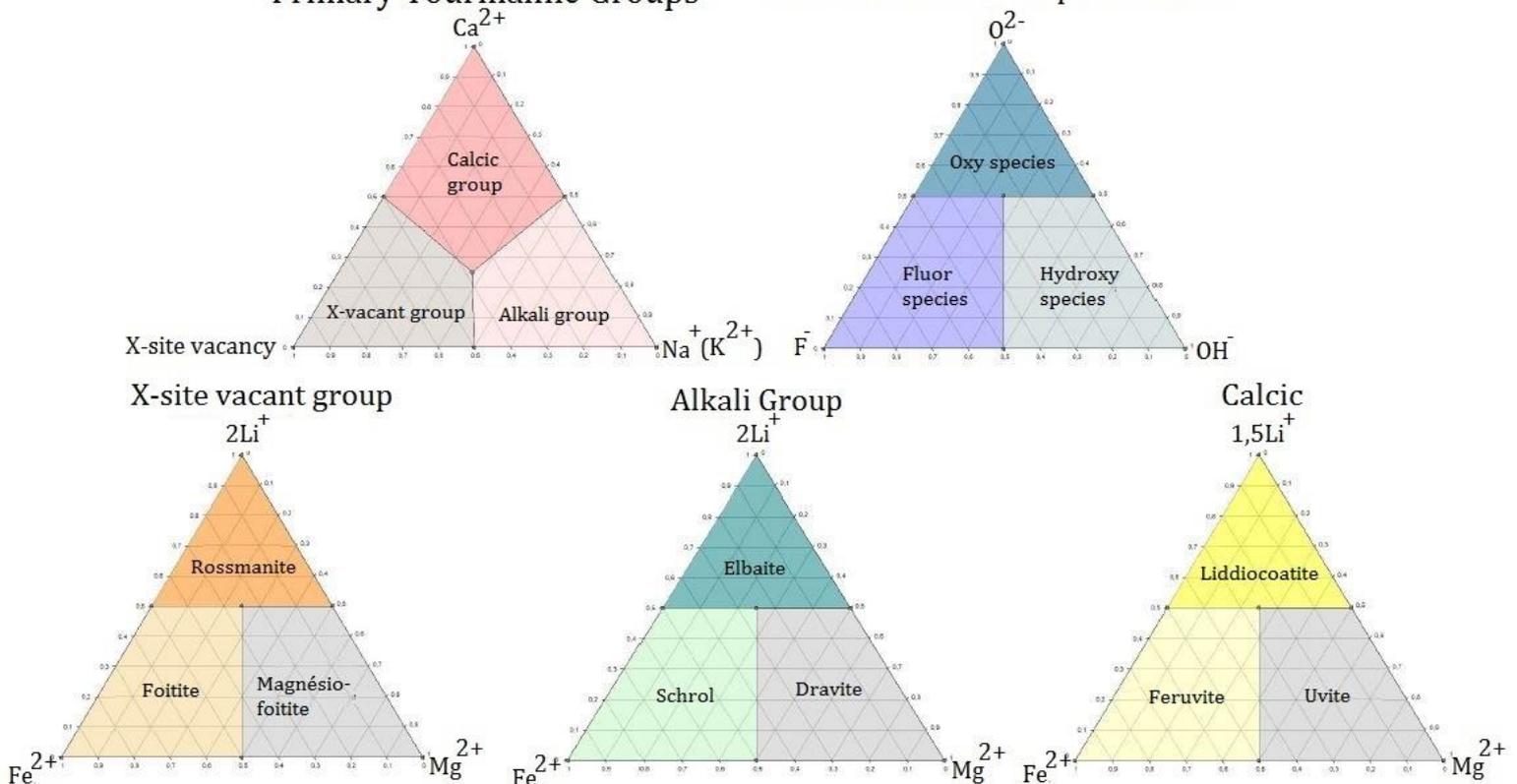


Figure 8 : Les différents types de classifications chimiques de la tourmaline. Modifié d'après Frank C. Hawthorne et al 2011 [4]. On peut ainsi sur cette figure retrouver les deux classifications générales que j'ai citées avant avec quelques variations. On comprend ainsi l'ambiguïté de la classification. En dessous, on a 3 diagrammes ternaires montrant les espèces et leurs relations suivant leur groupe. Diagramme à mettre en lien avec les diagrammes généraux de cette figure et de la figure 6 et 7.

General formula	(X)	(Y ₃)	(Z ₆)	T ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	V ₃	W
Alkali Group							
Dravite	Na	Mg ₃	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)
Chromium-dravite	Na	Mg ₃	Cr ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
Vanadium-dravite	Na	Mg ₃	V ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
Fluor-dravite	Na	Mg ₃	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	F
Fluor-schorl	Na	Fe ²⁺ ₃	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	F
Elbaite	Na	Li _{1.5} Al _{1.5}	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
Povondraite	Na	Fe ³⁺ ₃	Mg ₂ Fe ³⁺ ₄	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	O
Chromo-alumino-povondraite	Na	Cr ₃	Mg ₂ Al ₄	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	O
Fluor-buergerite	Na	Fe ³⁺ ₃	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(O) ₃	F
Olenite	Na	Al ₃	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(O) ₃	(OH)
Calcic Group							
Fluor-uvite	Ca	Mg ₃	MgAl ₅	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	F
Feruvite	Ca	Fe ²⁺ ₃	MgAl ₅	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
Uvite	Ca	Mg ₃	MgAl ₅	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
Fluor-liddicoatite	Ca	Li ₂ Al	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	F
Vacancy Group							
Foitite	□	Fe ²⁺ ₂ Al	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
Magnésio-foitite	□	Mg ₂ Al	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)
Rossmannite	□	Li Al ₂	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	(OH)

Tableau 2 : Composition de l'espèce de tourmaline acceptée par the International Mineralogical Association (IMA). Les encadrés correspondent aux tourmalines étudiées dans ce mémoire. Pour voir la position de chaque composé, voir les exemples des figures 2, 3, 4 et 5 .On remarque la large dominance du groupe alcalin, mais aussi le faible nombre d'espèces ayant du fluor. Cependant ce tableau ne montre que les espèces reconnues, et décrites. D'après Frank C. Hawthorne et al 2011 [4].

APPELLATIONS COMMERCIALES ET TARIFICATIONS

APPELLATIONS COMMUNES

Je ne décris dans cette partie que les espèces et les variétés les plus connues, la liste n'est donc pas exhaustive. (Tableau 2)

Elbaïte : Décrite en 1913 sur l'île d'Elbe en Italie d'où son nom.

Toutes les couleurs possibles, noms spécifiques variétés de pierres gemmes :

Achroïte : Variété incolore, pole pur de la série

Rubellite : Couleur rose, rouge, violet

Indigolite ou indicolite : Nuance(s) de bleu au sens large du terme

Verdelite : Nuance(s) de vert au sens large du terme

Noms de variétés chimiquement décrites :

Chromo-Elbaïte : Variété chromifère de Tanzanie

Curpo-Elbaïte : Variété cuprifère du Brésil et du Mozambique, souvent appelée « Paraíba ».

Sidérite : Bleu violacé

Tsilaisite : Jaune vert, variété manganésifère de Madagascar.

Autres noms spécifiques :

Watermelon : Elbaïte bi ou tricolore au cœur rose rouge et au couches externe vertes claire à sombre. Attention aux watermelon malgaches qui parfois sont des liddicoatites.

Mushroom : Variété qui cristallise de façon semblable à un champignon.

Moor's Head Tourmaline : Variété bicolore avec un corps transparent ayant une partie terminale noire

Tête de Turc : Corps du cristal vert avec une partie terminale rouge.

Dravite : Décrite (en 1883) pour la première fois dans la rivière de la vallée de la Drave, Autriche. Va du jaune pâle au marron foncé. Variété parfois gemme.

Chromdravite : Dravite chromifère, longtemps considérée comme une espèce de Dravite, mais est définie comme un minéral par l'IMA (International Mineralogical Association).

Fluordravite : Groupement OH remplacé par un Fluor. Considérée comme une espèce minérale par l'IMA en 2010.

D'autres variétés existes, mais ne sont pas ou très peu utilisées en Gemmologie, ni même très présentes sur le marché des collections.

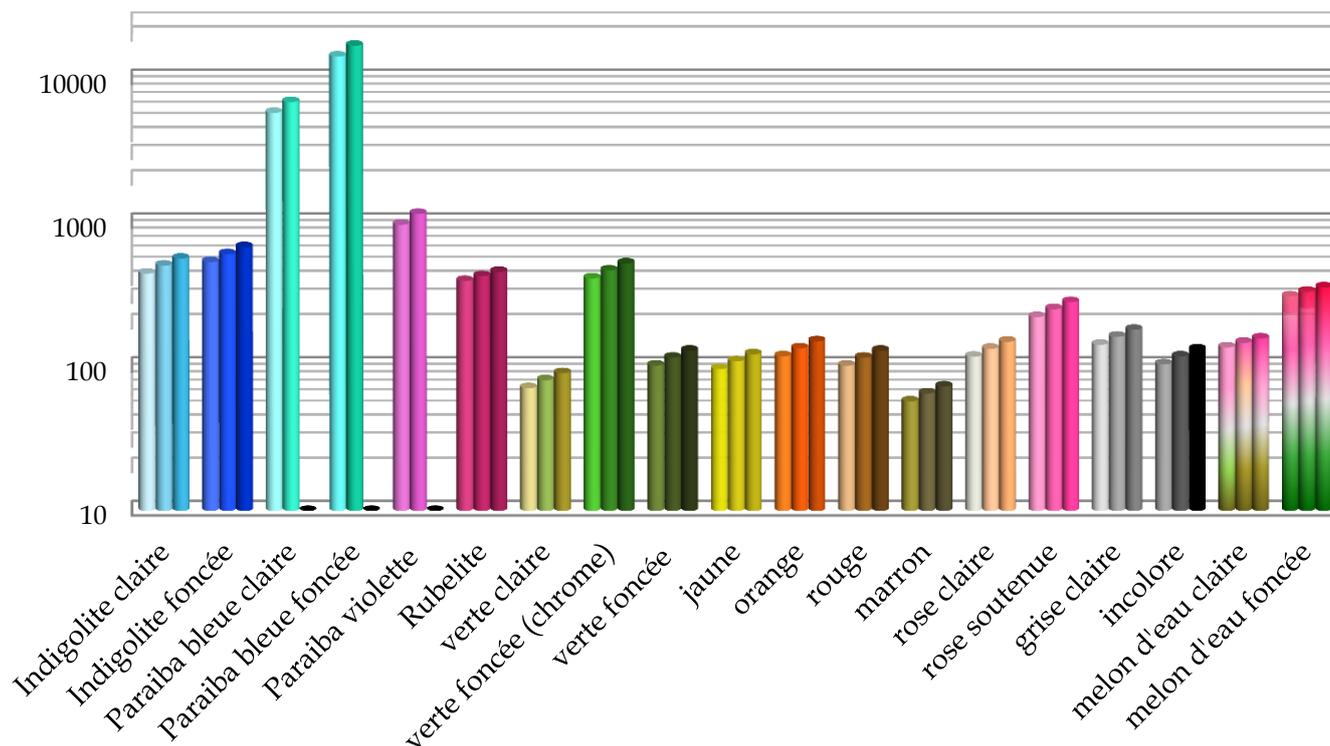
Schörl : Ou schörlite, autrefois comprenait toutes les tourmalines noires, possiblement décrite en 1524 par Matthesius. Noir opaque à légèrement translucide.

Fluor-schörl : Groupement OH remplacé par un Fluor. Considéré comme une espèce minérale par l'IMA en 2011.

Liddicoatite : Découverte en 1977 son nom lui a été donné en l'honneur d'un ancien président du Gemological Institute of America : Richard Thomas Liddicoat Jr. Elle possède la particularité de présenter une étoile semblable au logo Mercedes lorsque celle-ci est coupée en tranche selon l'axe C.

Fluor liddicoatite : Groupement OH remplacé par un Fluor. Espèce acceptée par l'IMA contrairement à la liddicoatite qui reste un nom commercial.

Tarifs de certaines tourmalines d'après Gemval, mai 2015



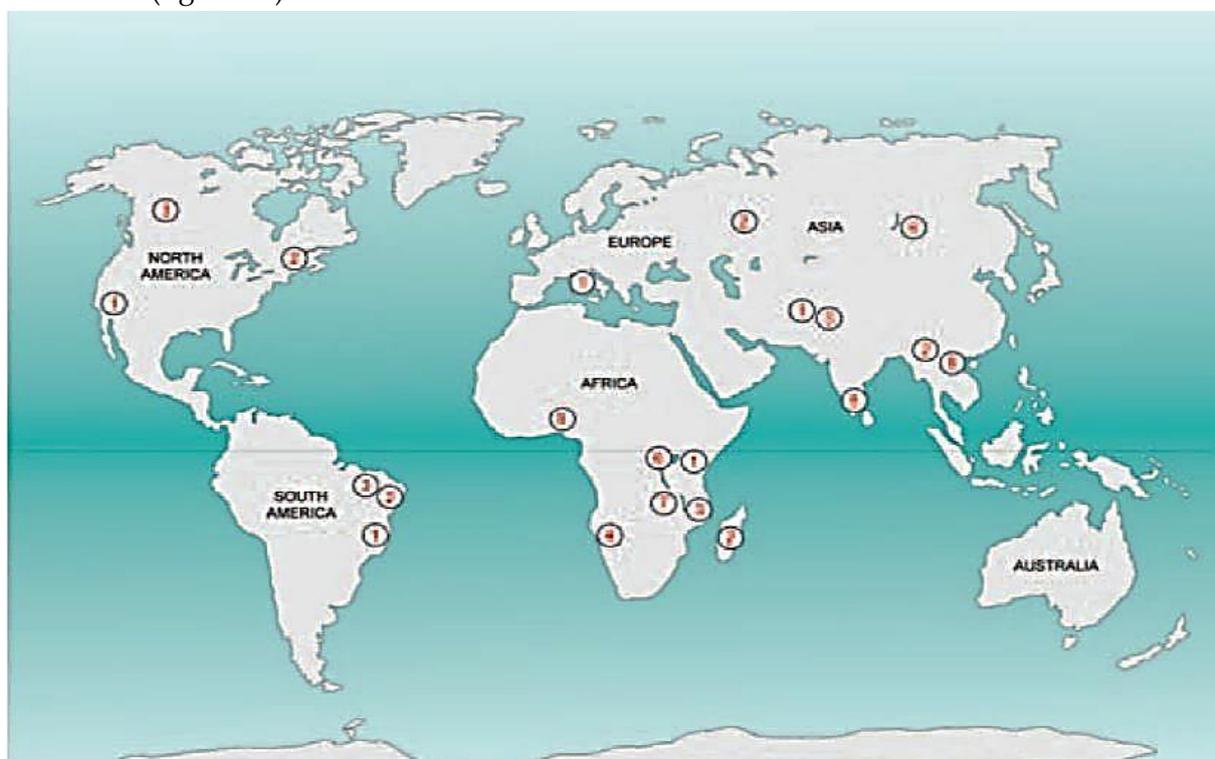
Légende faite par rapport à la tourmaline incolore de gauche à droite. De gauche à droite, 1, 3 et 5 carats. Prix exprimés en Dollars US (\$).

Figure 9 : Prix en Dollars de certaines catégories de tourmalines suivant leurs poids (de 1 à 3 carats). Le prix est basé sur une pureté excellente (VVS), pour les pierres moins pures, il faut multiplier par un coefficient les valeurs indiquées (VS = 0.920, SI1 = 0.859, SI2 = 0.740, I1 = 0.610). Données utilisées d'après Gemval, mai 2015. D'autres nuances de couleurs possibles. On remarque facilement que les tourmalines Paraiba sont les plus chères (10 fois plus chère que les indigolites qui viennent juste après, et 100 fois plus chère que les autres. De même que l'on voit que seules les couleurs bleues, vertes et roses ont des prix supérieurs à 200\$ le cts (à l'exception notable des tourmalines bi-tricolores, qui ont des évaluations tarifaires plus complexe...)).

On retrouve **une large gamme de prix** (figure 9), en effet on peut trouver facilement des tourmalines noires de schörl, ou des elbaïte vert dans du quartz pour des prix très bas, aussi bien en bourse aux minéraux qu'en magasin. Cependant, à partir du moment où **les cristaux sont beaux et bien développés, que les couleurs sont belles et particulières, de qualité gemme, ou que les origines soient connues, ...** Alors leur prix s'élève considérablement pouvant ainsi parfois dépasser ceux des 4 pierres précieuses. Pour exemple, on peut citer la **melon d'eau** qui peut facilement coûter **10 fois plus cher que la tourmaline noire simple**. On peut aussi citer la très connue « **Paraíba** », qui atteint **des tarifs extrêmes (10-100 fois le prix classique) pour une pierre fine**, j'ai pu lire à plusieurs endroits que certaines personnes considèrent que la tourmaline pourrait devenir la cinquième pierre précieuse. Bien entendu ces prix sont théoriques et doivent être en fonction de la qualité de la pierre, mais aussi de la demande.

II GITOLOGIE DE LA TOURMALINE

La tourmaline est **un silicate trouvé fréquemment et mondialement** (figure 10). Celle-ci est présente dans les **domaines magmatiques, métamorphiques, sédimentaires et même hydrothermaux** (figure 12). Sa recherche se fait soit directement, soit en tant que matériel secondaire d'une mine ou d'une carrière d'une gemme plus présente ou plus importante économiquement. On peut la trouver dans des roches de faciès diagénétique à granulitique. Malgré qu'elle soit fréquente, on ne retrouve **que 20 sites d'importance mondiale** (figure 10).



North America	(1) California, USA	Mesa Grande district	□
		Pala district	▼
		Ramona district	□
		Warner Springs	▼
(2) Maine, USA	Oxford County	▼	
	(3) Northwest Territories, Canada	O'Grady Lake	□
South America	(1) Minas Gerais, Brazil	Araçuaí district	◆
		Conselheiro Pena district	◆
		Malacacheta district	▼
		São José de Safira district	◆
(2) Paraíba, Brazil	São José da Batalha area	▼	
(3) Rio Grande do Norte, Brazil	Parelhas area	▼	
Africa	(1) Kenya	Mangare and elsewhere	▼
		(2) Madagascar	Antsirabe-Betafo area
	(3) Mozambique	Fianarantsoa area	▼
		Tsitondroina area	▼
		Nampula Province	◆
	(4) Namibia	Zambézia Province	▼
		Karibib area	▼
	(5) Nigeria	Nassarawa Province	◆
		Oyo Province	◆
	(6) Tanzania	Arusha area	▼
		Morogoro area	▼
		Tanga area	▼
	(7) Zambia	Kabwe district	□
		Lundazi district	▼

Europe	(1) Italy	Elba Island	□
	(1) Russia	Mursinka	□
Asia	(1) Afghanistan	Nuristan Province	◆
		Kunar Province	◆
	(2) Myanmar	Shan State	▼
		Mandalay State	▼
	(3) Pakistan	Gilgit-Baltistan	▼
		Azad Kashmir	▼
	(4) Russia	Transbaikalia	▼
	(5) Sri Lanka	Various	□
(6) Vietnam	Yen Bai Province	▼	

Figure 10 : Carte des pays producteurs et exploitants de tourmaline gemme à l'échelle mondiale, □ Production historique, ▼ production limitée, ▼ production significative et ◆ production exceptionnelle. D'après Shigley et al 2010 modifié par Federico Pezzotta et al 2011 [6]

LES GISEMENTS D'ORIGINE MAGMATIQUE

L'un des environnements **les plus favorables** à la formation de ce minéral est celui des **pegmatites**.

Les pegmatites sont des **roches magmatiques tardives** Donc les dernières cristallisations de lignées magmatiques qui **concentrent les éléments incompatibles en quantité importante**. Elles sont composées d'une **part importante d'eau dissoute**. Sa **composition générale est celle d'un granite**. Elle résulte donc de la **cristallisation finale** d'un magma silicaté à la composition granitique, riche en éléments incompatibles (différentiation du magma d'origine). **C'est la présence d'eau dissoute en grande quantité** qui facilite la **diffusion des éléments chimiques**. Les cristaux **cristallisent rapidement** et on en permanence tous les éléments nécessaires à leurs cristallisations pour former **de grands cristaux automorphes** et ce même avec des vitesses de refroidissement rapide. **Leurs tailles est pluri-centimétrique à pluri-décimétrique voir pluri-métrique**. On peut citer comme minéraux typiques de ces roches les béryls, topazes, grenats, apatites, quartz, feldspaths, micas,...

Les pegmatites forment des filons, poches ou même des auréoles autour ou à proximité des plutons granitiques dont elles sont génétiquement liées.

Ce sont généralement dans les pegmatites que l'on retrouve les plus grands gisements de pierres précieuses et fines.

Les pegmatites les plus connues sont celles de Madagascar (pegmatite du mont Ibity (Thierry Douillard DU Nantes2003 [7]), Etats-unis d'Amérique (Georgia, Kristen M Longfellow and Samuel E Sanwson 2011 [8]),...

LES GISEMENTS D'ORIGINE HYDROTHERMAL

Ces gisements fonctionnent **par la circulation d'eau chaud (>150°C)** dans les roches qui induit **une diffusion des différents éléments**, ce qui permet **la nucléation et la cristallisation de certaines tourmalines**. L'eau circule dans les fissures et, est mise en mouvement par convection thermique. Elle se charge alors en éléments, par dissolution, qu'elle transporte. Ces éléments finissent par précipiter pour former **des cristaux**

généralement orientés vers l'intérieur des fissures. Dans cette famille de formations géologique, on note aussi les fumerolles dans les océans, mais je n'ai pas trouvé d'études montrant la présence de tourmalines dans ces zones-là. Les autres minéraux précipitants dans un contexte hydrothermal sont : L'émeraude (béryl, notamment en Amérique du sud), la fluorite, baryte, quartz, calcite,... Ils précipitent par apport d'éléments classiques (Si, O, ...) mais aussi particuliers (B, Li,...) lié à la dissolution des roches en amont.

LES GISEMENTS D'ORIGINE METAMORPHIQUE

La terre étant une planète dynamique sans cesse en mouvement, les roches et minéraux qui se forment possèdent des conditions de pression et de température optimales pour leurs formations. Par les mouvements tectoniques, les roches et minéraux sont transportés dans des conditions de pression et de température différentes, et parfois ces conditions (diagramme de phases, figure 11) varient tellement qu'ils sortent de leurs domaines de stabilités. Les minéraux se transforment alors, en un ou plusieurs autres minéraux possédant la même composition globale que la roche initiale (sans mobilité des éléments, ce serait le métasomatisme). On remarque ainsi que le champ de stabilité de la tourmaline est 0-725 °C à la surface et jusqu'à 70kbar (suivant sa composition) (Figure 11).

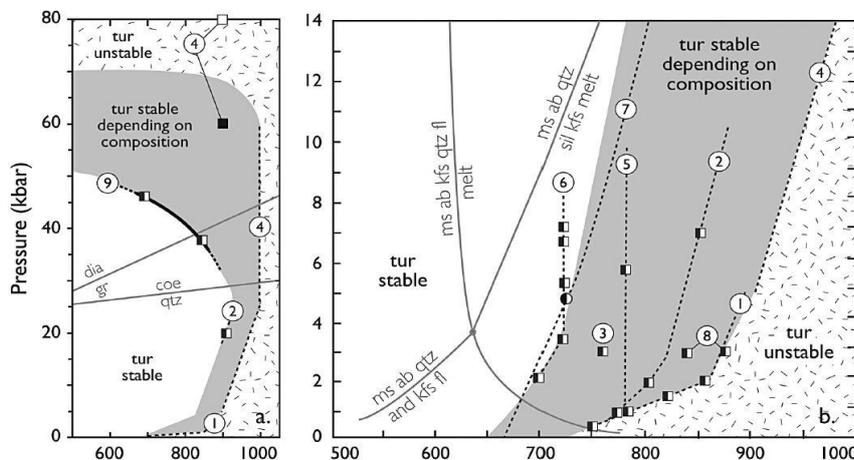


Figure 11 : Diagramme de phases et domaines de stabilités de la Tourmaline. On note ainsi que le champ de stabilité de la tourmaline est 0-725 °C à la surface et jusqu'à 70 kbar (suivant sa composition). D'après Vincent J. van Hin Sberg, 2011 [9]

LES GISEMENTS D'ORIGINE SEDIMENTAIRE

Il existe deux types de gisements sédimentaires où l'on peut trouver de la tourmaline. Le premier est semblable au métamorphisme (figure 11), sauf qu'il n'affecte pas des conditions de pression et de température différentes (<150°C et quelques Kbar de pression). On l'appelle la diagenèse. Il s'agit d'un changement minéralogique par compression et perte d'eau. Les tourmalines fréquentes sont souvent incolore (achroïte) appartenant à l'espèce dravite, et sont dans des calcaires magnésiens ou dolomitiques avec une forte proportion de Bore.

Le second type de gisement sédimentaire est dû à la forte résistance à l'altération des tourmalines. Cela induit la création de galets et sables composés de tourmaline et d'autres cristaux résistants tels que le quartz. Ainsi à proximité d'un gisement mentionné auparavant, ou dans le lit d'un fleuve ou d'une rivière le traversant, on trouve dans les placers des tourmalines de qualité souvent secondaire, mais parfois gemme (Massif central qualité secondaire trouvée personnellement).

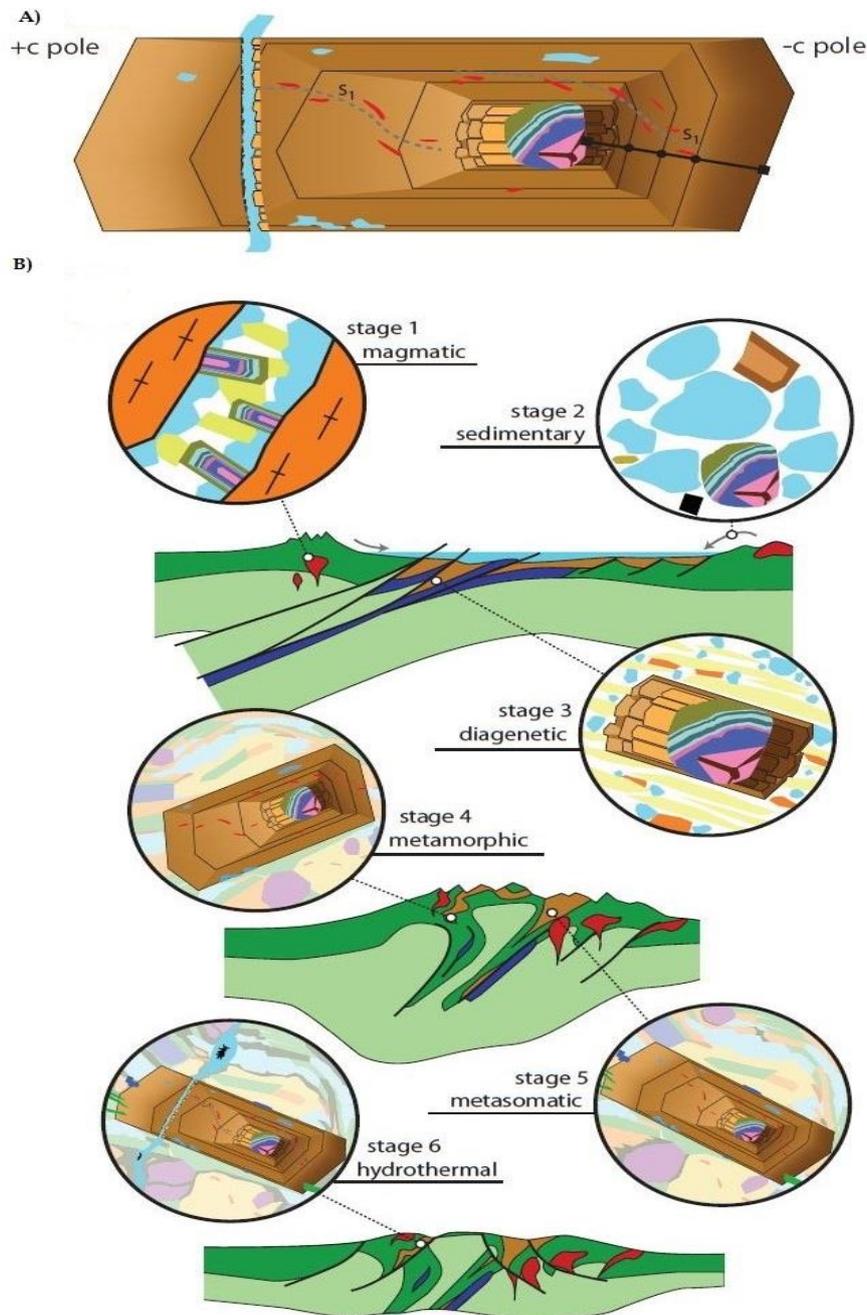


Figure 12 : Schéma synthétisant les différents épisodes idéaux sur plusieurs tourmalines multigénérationnelles ayant rencontrée plusieurs environnements et processus géologiques distinct (1b). Modifiée d'après Vincent J. van Hinsberg et al, 2011 [10]. De l'intérieur vers l'extérieur, le grain contient : Un noyau détritique arrondi (formé par la cristallisation magmatique), une surcroissance diagénétique asymétrique avec une croissance préférentielle vers le pôle +, Métamorphisme et métasomatisme donnant une foliation interne et une croissance rapide (inclusions et fractures de surfaces). Une croissance polaire et une zonation du sablier est mis en avant pas un ombrage. Une ligne noire épaisse marque le transept suivit par leur expérience. Les paramètres géologiques pour la croissance du grain de tourmaline montré en A sont: réglage de magmatique (1) à la suite d'intempéries (2); la croissance diagénétique sur les grains de reliques dans une sédimentaire bassin (3); la croissance métamorphique prograde (4); la croissance méta somatique rétrograde en raison de l'entrée de bore dans des fluides à partir d'un pluton de refroidissement (5); et la croissance dans cassants extension fractures associées à la formation des minerais (6).

En conclusion la tourmaline est l'un des minéraux les plus communs sur terre, et son histoire de cristallogénèse peut nous renseigner sur de nombreux processus géologiques [10].

III ECHANTILLONS ETUDIÉS

Dans le cas de mon DU de gemmologie, j'ai voulu **multiplier les origines des tourmalines** à analyser, afin d'avoir **un échantillonnage variés et représentatif de sa diversité**. C'est pourquoi j'ai utilisé des tourmalines taillées et brutes provenant des collections du DUGEM prêtées par Mr Panczer, des tourmalines brutes et en lames minces de Mr Martelat du Laboratoire de géologie de Lyon, et des tourmalines issues de ma collection personnelle (tableau 3, 4, 5).

Tableau 3 à 5: Echantillons analysés

Tableau regroupant les différents échantillons que j'ai pu analyser durant ce DU.

N°	Photo	Origine	Collection	Poids dimension (cm)	Taille
1		Madagascar	Personnelle	1,41 Carats 6,38*8,27*4,43	Poire
2		Madagascar	Personnelle	0,84 Carats 5,06*7,12*2,69	Emeraude
3		Madagascar	Personnelle	0,64 Carats 5,23*4,6*2,68	Baguette
4		Madagascar	Personnelle	0,51 Carats 5,06*5,03*2,68	Coussin
5		Madagascar	Personnelle	0,45 Carats 5,26*4,19*2,33	Emeraude
6		Madagascar	Personnelle	0,54 Carats 3,90*5,46*2,82	Emeraude
7		Madagascar	Personnelle	0,55 Carats 3,84*5,56*2,83	Emeraude
8		Madagascar	Personnelle	0,42 Carats 3,64*4,68*2,84	Emeraude

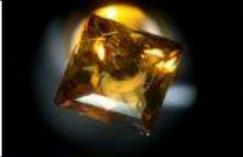
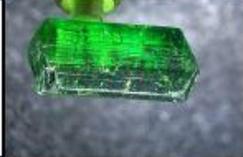
Photos faites avec une binoculaire Zeiss Stemi 2000-C et appareil photo Nikon E995 Coolpix, et prises sur fond blanc, noir ou avec l'usage d'une ventouse.

Tableau 3 à 5: Echantillons analysés

N°	Photo	Origine	Collection	Poids et taille (mm)	Taille
9		Madagascar	Personnelle	0,81 Carats 4,56*7,82*2,73	Coussin
10		Madagascar	Personnelle	0,35 Carats 4,17*4,31*2,70	Princesse
11		Madagascar	Personnelle	0,33 Carats 3,9*3,89*2,42	Princesse
12		Inconnue	DUGEM Mr Panczer	2,51 Carats 10,08*6,91*4,47	Poire cabochon
13		Inconnue	DUGEM Mr Panczer	0,65 Carats 7,38*3,84*2,54	Navette cabochon
14		Madagascar	Personnelle	0,54 Carats 6,62*3,59*2,47	Emeraude
15		Madagascar	Personnelle	0,43 Carats 3,96*5,78*2,27	Coussin
16		Madagascar	Personnelle	0,48 Carats 6,47*3,5*2,7	Baguette

Photos faites avec une lunette Zeiss Stemi 2000-C et appareil photo Nikon E995 Coolpix, et prises sur fond blanc, noir ou avec l'usage d'une ventouse.

Tableau 3 à 5: Echantillons analysés

N°	Photo	Origine	Collection	Poids et taille (cm)	Taille
17		Madagascar	DUGEM Mr Panczer	2,87 Carats 11,91*7,43*4,48	Brute
18		Inconnue	DUGEM Mr Panczer	0,39 Carats 4,17*4,08*3,03	Princesse
19		Inconnue	DUGEM Mr Panczer	3,31 Carats 11,63*5,93*4,88	Brute
20		Brésil	Personnelle	Ø Carats	Brute
21		Inconnue	DUGEM Mr Panczer	3,16 Carats 15,01*4,27*4,40	Brute
22		Inconnue	UCBL Mr Martelat	Ø Carats lame mince	Lame mince
23		Madagascar	UCBL Mr Martelat	Ø Carats lame mince	Sucre
24		Madagascar	Personnelle	0,31 et 0,41 grammes 11,23*9,93*1,56 11,37*9,27*1,45	Tranches

Photos faites avec une binoculaire Zeiss Stemi 2000-C et appareil photo Nikon E995 Coolpix, et prises sur fond blanc, noir ou avec l'usage d'une ventouse.

Pour réaliser au mieux cette étude, on a considéré comme échantillons de références certaines pierres vue elles correspondaient visuellement et typiquement à l'espèce qu'elles représentent. Elles ont été utilisés afin d'avoir à tout moment la possibilité de croiser d'autres résultats entre eux (Tableau 3, 4 et 5 : Echantillons 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24). Ces références font partit de mes échantillons, pour pouvoir corrélér toutes les mesures, les

utiliser **malgré leur caractère arbitraire** permet une meilleure vision globale et **interprétative**, même si je suis conscient des approximations que cela engendre.

Maintenant que les pierres ont été présentées, nous allons pouvoir nous pencher sur les résultats de l'étude de celles-ci.

IV TECHNIQUES DE CARACTERISATIONS ET RESULTATS BRUTS

ANALYSE GEMMOLOGIQUE PAR TECHNIQUES STANDARD

Il m'a semblé intéressant de commencer mon étude par des **mesures simples et communes présentant une complexité croissante**. Ces analyses classiques, j'ai pu les réaliser avec le matériel mis à disposition par le DUGEM.

DENSITE

L'une des méthodes gemmologique la plus simple pour déterminer une famille minérale, est la **détermination de la densité de la pierre inconnue**. Tout corps possède une densité qui lui est propre, et qui dépend de sa composition. La densité se calcule avec la formule suivante :

$$\text{densité} = \frac{\text{Poids dans l'air}}{\text{Poids dans l'air} - \text{Poids dans l'eau}}$$

La densité n'a pas d'unité, c'est un rapport de masse.

Cette méthode réalisée à l'aide d'une **balance hydrostatique** (figure 13), **manque parfois de précisions, suivant la famille minérale étudiée, ou même les inclusions que la pierre comporte**. Pour la tourmaline on a, par exemple **une densité qui doit être de 3.02-3.26**. Mais celle-ci **ne varie pas de façon visible et sûre entre les différentes variétés**. A noter qu'il existe de **nombreux autres minéraux qui ont une densité qui s'inscrit dans cet intervalle**. Entre 3 et 3.3 on retrouve l'apatite (3.17-3.23), l'andalousite (3.12-3.18), la kunzite (3.16-3.2), la pezzotaite (3.09-3.11),... (Exemple prit suivant leur ressemblance avec la tourmaline).

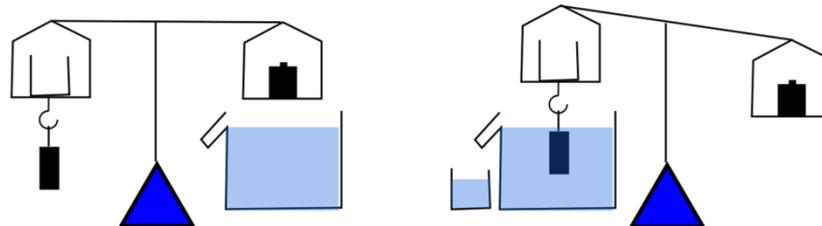


Figure 13 : Schéma de fonctionnement d'une balance hydrostatique, modifié d'après Wikipédia.

RESULTATS

Tourmalines	Poids dans l'air	Poids dans l'eau	Densité
1	0,282	0,1884	3,01
2	0,1695	0,1141	3,06
3	0,129	0,0872	3,08
4	0,1031	0,0698	3,09
5	0,0901	0,0604	3,03
6	0,1092	0,0733	3,04
7	0,1098	0,0734	3,01
8	0,0843	0,0562	3,00
9	0,1622	0,11	3,10
10	0,0714	0,0481	3,06
11	0,0661	0,0446	3,07
12	0,5019	0,3393	3,08
13	0,1308	0,0884	3,08
14	0,1096	0,0743	3,10
15	0,0865	0,0587	3,11
16	0,0965	0,0632	2,89
18	0,0792	0,0531	3,03

Tableau 6: Résultat de la réfractométrie et de la biréfringence des tourmalines testées.

On peut voir d'après ces résultats (tableau 6) que les échantillons font partie de l'intervalle 2.89-3.11, on a ainsi **4 échantillons qui possèdent une densité inférieure à l'intervalle de référence (1, 7, 8, 16)**. Ce qui peut s'expliquer par des **changements internes tels que les fissures, inclusions, ou autres**.

INCLUSION

Les inclusions renseignent souvent sur le caractère naturel ou synthétique des gemmes. En effet, les techniques de cristallogenèse provoquent souvent **des inclusions typiques**. De même, **certains gisements possèdent leurs propres types d'inclusions** (eau, gaz, petits minéraux secondaires,...) ce qui permet parfois **de retrouver l'origine** d'une pierre par comparaison avec **des faciès d'inclusion particulier à un gîte minier** que l'on ne retrouve pas ailleurs. **Un des critères d'identification est notamment la présence de H₂O-CO₂ formant des canaux.**

Voici quelques exemples d'inclusions (tableau 7) que j'ai retrouvé dans mes tourmalines.

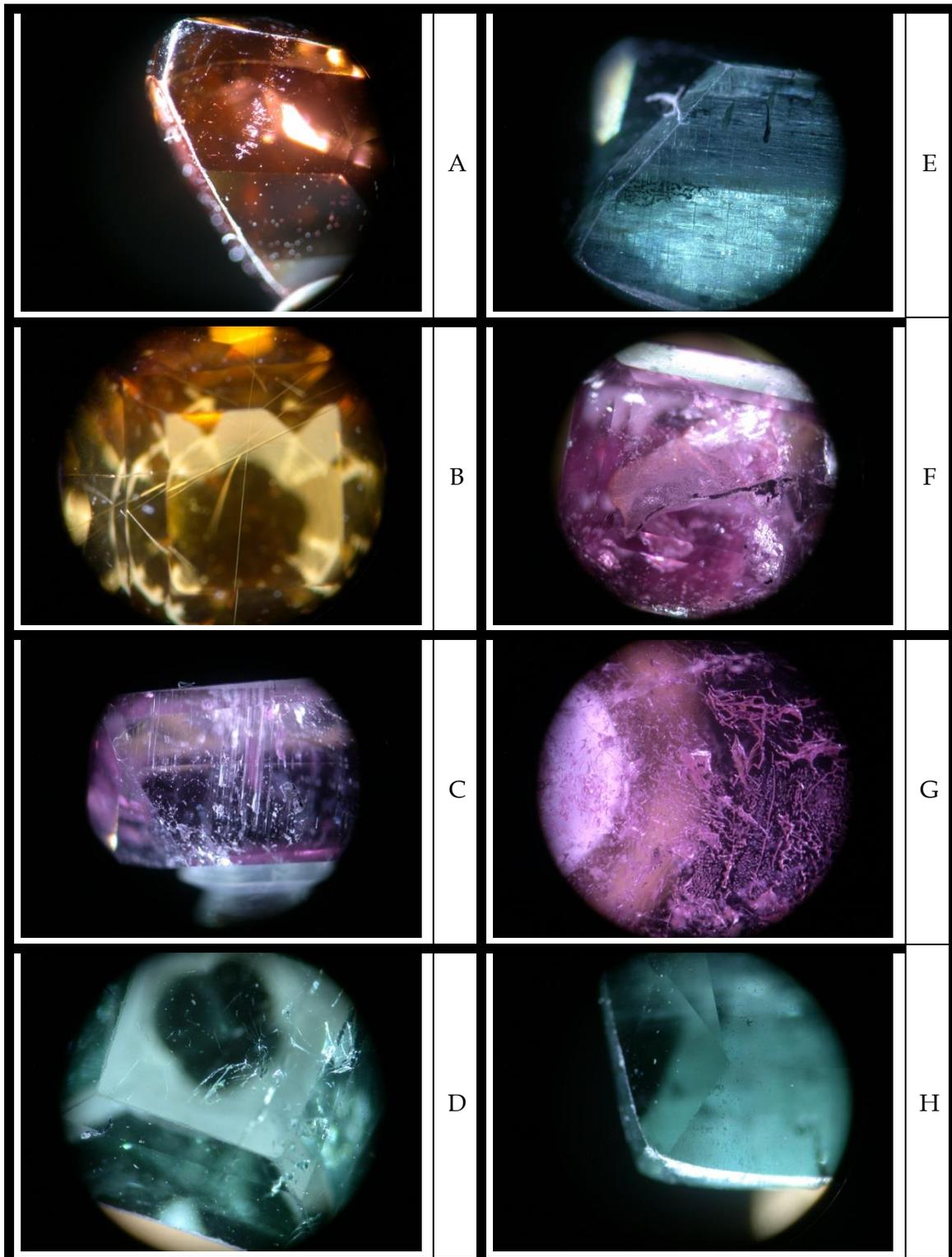


Tableau 7 : Inclusions observées dans des tourmalines (par rapport aux tableaux 3 à 5). La tourmaline A correspond à la tourmaline 1, B à la 18, C à la 6, D à la 10 E à la 9, F à la 8, G à la 24, H à la 15. En A, E, C, G, D, H défaut de cristallisation, ou épisode succinct de dissolution qui semblent être en lien avec la croissance du minéral. La G présente un liquide dans ces zones ainsi que des bulles de gaz (libelles). En B aiguilles fines de nature inconnue (Rutile ?). En F sorte de voile, possible trichite. En D fracture.

Ces inclusions semblent **relativement courantes** dans les tourmalines et peuvent **influencer sur leurs prix**. Je n'ai pour le moment pas trouvé de **liens entre ces inclusions et la géologie**.

REFRACTOMETRIE

Le réfractomètre est **un outil optique** (figure 14) des **plus précis** pour la gemmologie. On peut **reproduire très facilement** les mesures, et son **utilisation est des plus simples**. Les conclusions que l'on tire des résultats de ces mesures permettent très souvent de donner un **avis sûr et définitif sur la nature** d'une pierre gemme. L'utilisation de cet appareil admet **certaines limites**. L'utilisation d'**iodure de Méthylène** comme **liquide de contact** rend les **mesures impossibles au-delà d'un indice de réfraction de 1.790**. Le principe est simple, il s'agit des **lois de réfraction et réflexion de la lumière dans le cristal** (nécessite une transparence suffisante et une opacité moindre).

Mais cet appareil donne aussi des **indications sur l'isotropie de l'objet étudié**. On peut ainsi savoir s'il est **isotrope ou anisotrope** et dans ce dernier cas, s'il est **Uniaxe positif ou négatif, ou encore Biaxe**.

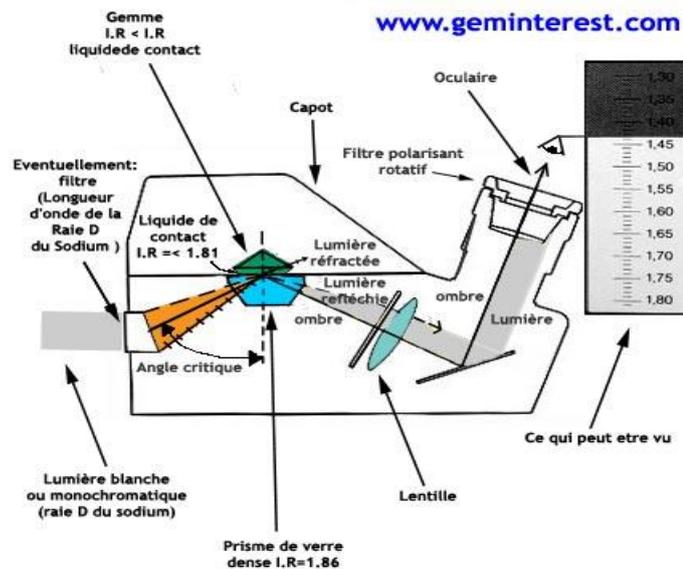


Figure 14 : Schéma légendé de fonctionnement d'un réfractomètre. D'après Geminterest.

On devrait trouver pour ces **mesures les valeurs suivantes pour la famille de la Tourmaline** : **Indice de réfraction (min ; max) 1.616 ; 1.652** avec une **biréfringence allant de -0.014 à -0.021**.

RESULTATS

On peut voir dans ces mesures (tableau 7) que **certaines tourmalines présentes des indices minimums (4, 12, 13 14, 15, 18) plus petits que l'indice de référence**, cependant elles **ne dépassent pas la valeur maximale**. On peut aussi remarquer que **tous les échantillons ne sont pas uni axiaux**, que certains sont **positifs**, et d'autres **négatifs**. De même ces échantillons **ne sont pas ceux qui avaient une densité non standard**. Ces spécificités peuvent être dues à des **anomalies de structures, à l'évolution des conditions de croissances ou un stress interne de la structure** (D'après Alexander Shtukenberg et al, 2007 [11]).

<i>Orientations Tourmalines</i>					<i>Biréfringence</i>
1	1,618	1,618	1,620	1,618	
	1,635	1,632	1,638	1,633	-0,02
2	1,640	1,632	1,622	1,628	
	1,640	1,641	1,639	1,639	-0,018
3	1,638	1,623	1,618	1,630	
	1,640	1,638	1,638	1,638	-0,022
4	1,611	1,630	1,618	1,622	
	1,638	1,638	1,638	1,637	-0,027
5	1,618	1,620	1,620	1,618	
	1,638	1,638	1,638	1,635	-0,02
6	1,619	1,619	1,619	1,619	
	1,638	1,639	1,638	1,638	-0,02
7	1,618	1,618	1,619	1,620	
	1,632	1,634	1,635	1,635	-0,017
8	1,620	1,619	1,618	1,618	
	1,635	1,635	1,633	1,633	-0,017
9	1,640	1,632	1,620	1,628	
	1,640	1,640	1,640	1,640	-0,02
10	1,632	1,622	1,618	1,622	
	1,640	1,638	1,638	1,639	-0,022
11	1,622	1,632	1,640	1,630	
	1,635	1,642	1,640	1,642	-0,02
12	1,610	1,610	1,612	1,612	
	1,628	1,622	1,630	1,628	-0,02
13	1,611	1,610	1,610	1,611	
	1,622	1,622	1,612	1,623	-0,013
14	1,610	1,628	1,618	1,632	
	1,640	1,638	1,640	1,638	-0,03
15	1,610	1,635	1,620	1,635	
	1,640	1,642	1,640	1,640	-0,032
15 identique visuellement	1,640	1,632	1,620	1,628	
	1,640	1,640	1,640	1,640	-0,02
16	1,640	1,625	1,620	1,621	
	1,640	1,640	1,638	1,635	-0,02
16 identique visuellement	1,642	1,630	1,622	1,629	
	1,642	1,642	1,642	1,641	-0,02
Liddicoatite Référence	1,621	1,621	1,621	1,621	
	1,639	1,638	1,638	1,640	-0,019
Melon d'eau Référence	1,623	1,622	1,620	1,621	
	1,640	1,640	1,640	1,638	-0,02
18	1,612	1,620	1,630	1,620	
	1,635	1,630	1,635	1,632	-0,023

Tableau 8 : Mesures de réfractométries effectuées sur les tourmalines étudiées. Toutes les mesures ont été effectuées avec le même appareil personnellement. Par identique sous entend deux pierres gemmes taillées provenant du même endroit et étant de même aspects visuel et même tailles.

ANALYSE GEMMOLOGIQUE PAR TECHNIQUES DE LABORATOIRE

Les analyses typiques de laboratoire gemmologique reposent sur **des méthodes non destructives connues et sur plusieurs effets physiques. L'effet Raman aussi appelé diffusion Raman, la luminescence et l'absorption optique** sont les méthodes ou effets que je vais vous présenter maintenant et que j'ai eu la possibilité d'utiliser au Centre commun de Microscopie Optique (CECOMO) de l'Université Lyon 1 Claude Bernard.

MICROSPECTROMETRE RAMAN

On peut réaliser avec cet appareil (figure 15) **deux types de mesures distincts**, mais liés : **L'effet Raman et la luminescence**.

Technique non destructive, le Raman est un outil très puissant permettant de **mettre en avant la structure d'un matériau** par simple interaction avec une lumière monochromatique. Il s'agit là d'un spectromètre qui fait **une analyse vibrationnelle** de la matière. La lumière sous forme d'un laser va venir donner une petite quantité d'énergie aux liaisons atomiques, les faisant alors **vibrer avec des modes différents suivant les caractéristiques des liaisons (rotation, élongation, raccourcissement, asymétrie,...)**. Il permet de mesurer les fréquences de vibrations d'une molécule ou d'un cristal. Ainsi il **caractérise de façon fine un matériau**, et permet ainsi d'obtenir une **signature de sa structure**. Celle-ci peut se **reproduire très facilement et reste unique**. C'est finalement le **moyen le plus précis pour connaître la nature du matériau utilisé**, mais pour cela **il faut avoir des échantillons de références**, dont on connaît de façon presque certaine l'espèce. De plus, il est nécessaire de faire ces analyses suivant **tous les axes de symétrie d'un cristal de référence** (figure 16 et 21) voir notations de Porto pour plus de détails.

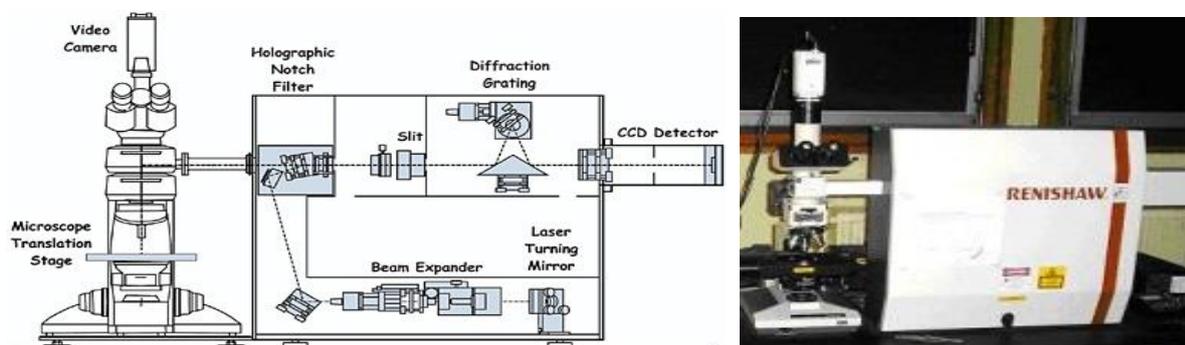


Figure 15: *Microspectromètre Raman Renishaw RM 1000, schéma de "Raman Microscopy in the Identification of Pigments on Manuscripts and Other Artwork-Robin J. H. Clark." (Sackler NAS Colloquium) Scientific Examination of Art: Modern Techniques in Conservation and Analysis. Washington, DC: The National Academies Press, 2005. Et photo du Raman utilisé pour cette étude, appartenant au CECOMO (Centre COmmun de Microscopie Optique).*

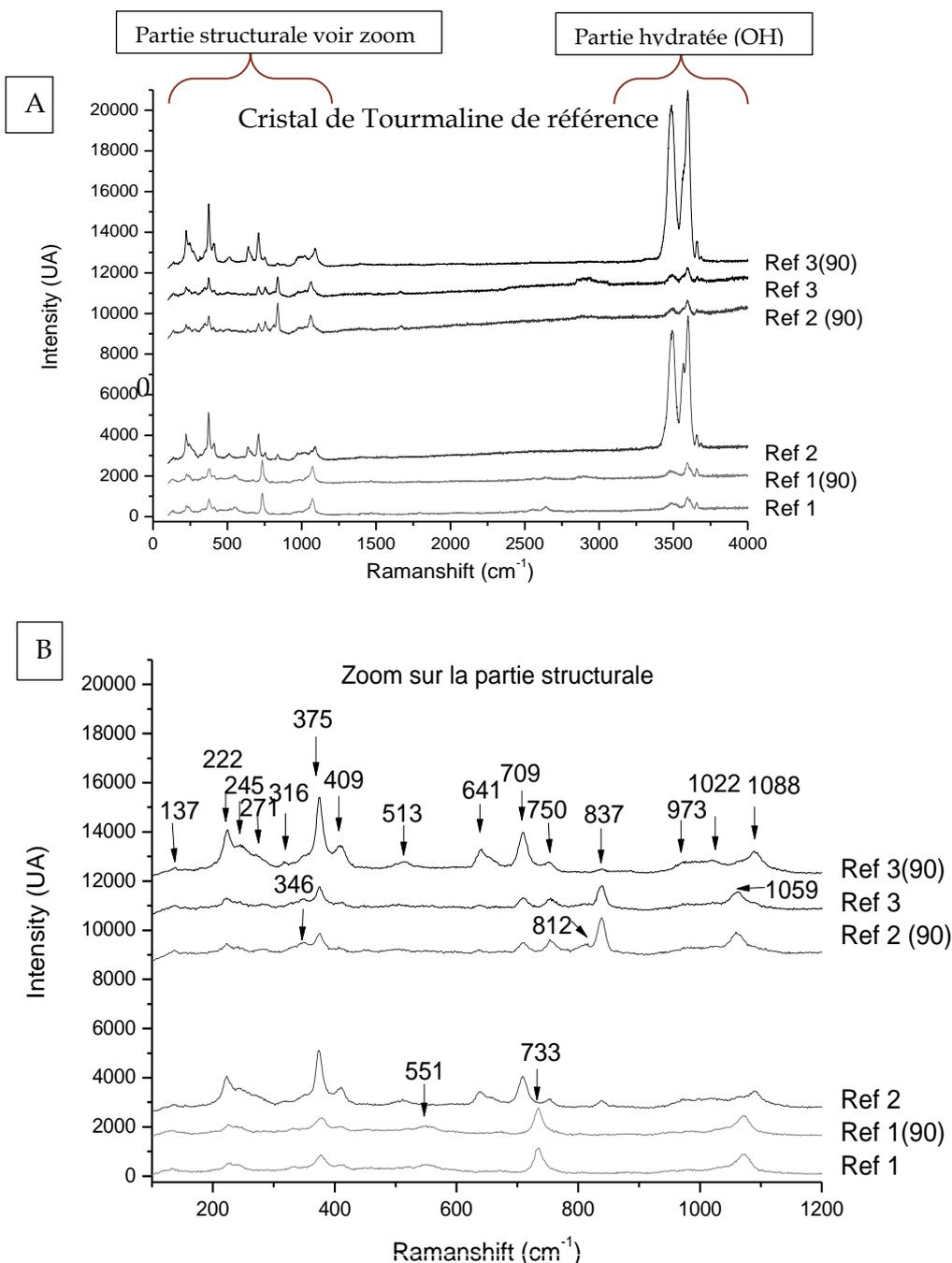
La luminescence est une lumière qui est créée par la matière elle-même. Les atomes ainsi chargés **vont émettre une lumière dite froide** (en comparaison avec la lumière incandescente dite chaude, car produisant aussi de la chaleur). Rentre dans cette catégorie l'Electroluminescence, la Photoluminescence (fluorescence et phosphorescence), la Chimiluminescence (bioluminescence), la Cristalloluminescence (modification structural cristalline), la Thermoluminescence, la Radioluminescence,... Avec le micro spectromètre Renishaw RN 1000, on peut enregistrer **les phénomènes de luminescence sur une gamme spectrale suffisamment large pour recouvrir la gamme du visible**. Cette mesure permet de se **rendre compte de la couleur du matériau** par comparaison avec la couleur du laser, mais aussi de **mettre en évidence des bandes fines due à des éléments particuliers, comme les Terres rares**.

ABSORPTION

La couleur des matériaux est **souvent due à la composition** de ceux-ci. La ou les couleur(s) qu'ils absorbent sont liées **directement à leur couleur « résiduelle »**. La méthode d'analyse de l'absorption est ainsi **basée sur l'absorption de l'énergie rayonnante par le matériel étudié**. Si la couleur est portée par des **éléments chromophore** (qui portent la lumière), on retrouvera **des pics correspondants à l'absorption de ses ou ses couleurs complémentaires (s)**. On peut aussi retrouver **de fins pics correspondant à des éléments particuliers qui nous renseigneraient sur la composition chimique**.

RESULTATS DE REFERENCE

DIFFUSION RAMAN



COMMENTAIRES :

On peut voir sur le spectre Raman allant de 0-4000cm⁻¹ plusieurs choses.

Une part importante de la partie hydratée qui s'exprime fortement suivant les plans Ref3(90) et Ref 2. Cette partie semble quasi disparaître sur les autres plans, ce qui peut induire en erreur sur la composition en eau des tourmalines. (Figure 16 A).

Sur la partie structurale, on observe l'apparition et la disparition de certains pics (409, 641, 837 cm⁻¹), ainsi que la migration d'autres pics (aux alentours de 720, 1070, ...cm⁻¹).

On remarque aussi des pics typiques : 222, 375, 409 fixe, et certaines légèrement variable : 710-750, 1050-1090

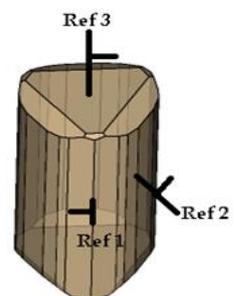


Figure 16 : Résultats suivants toutes les orientations possibles de la diffusion Raman sur un cristal de tourmaline (532nm) (n°21 tableau 5) et image montrant la position des différentes mesures. Chaque axe étant mesuré deux fois avec une rotation de 90 degrés.

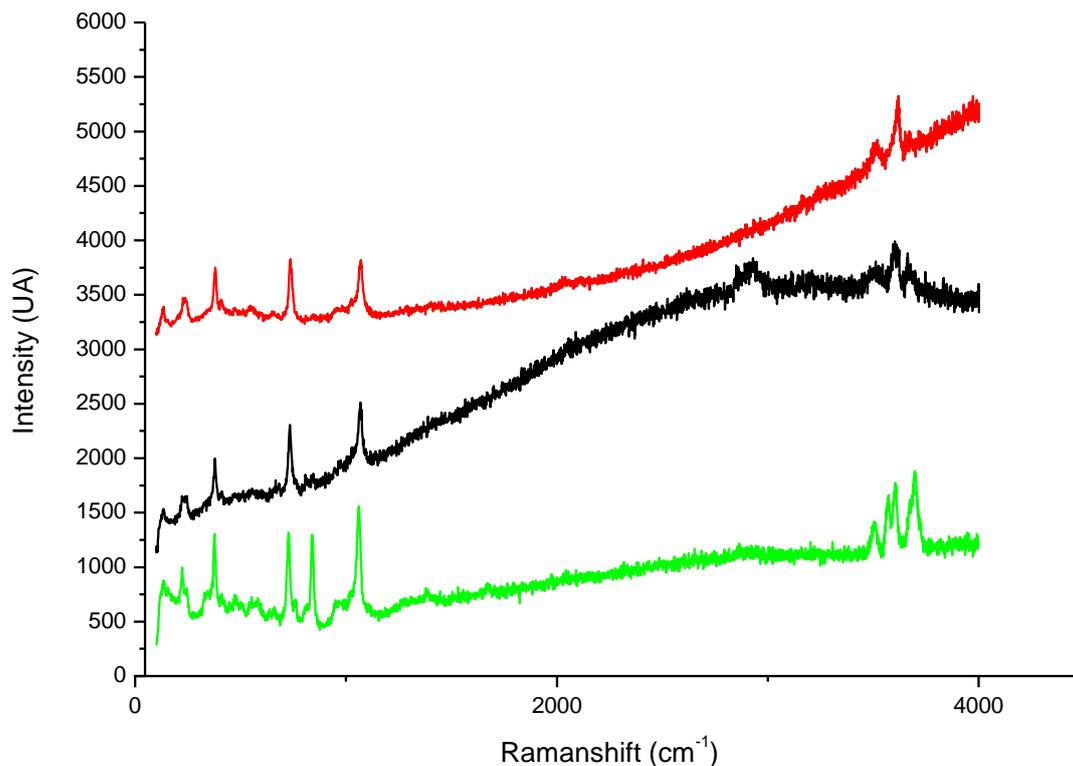


Figure 17: Résultats des mesures de diffusion Raman sur une tourmaline melon d'eau (liddicoatite n°5 tableau 3). Spectre vert pour la zone verte, noir pour la zone blanche et rouge pour la zone rouge à 532nm. tourmaline n°5 (tableau 3-5). De 100-4000cm⁻¹

Comparaison des spectres de référence

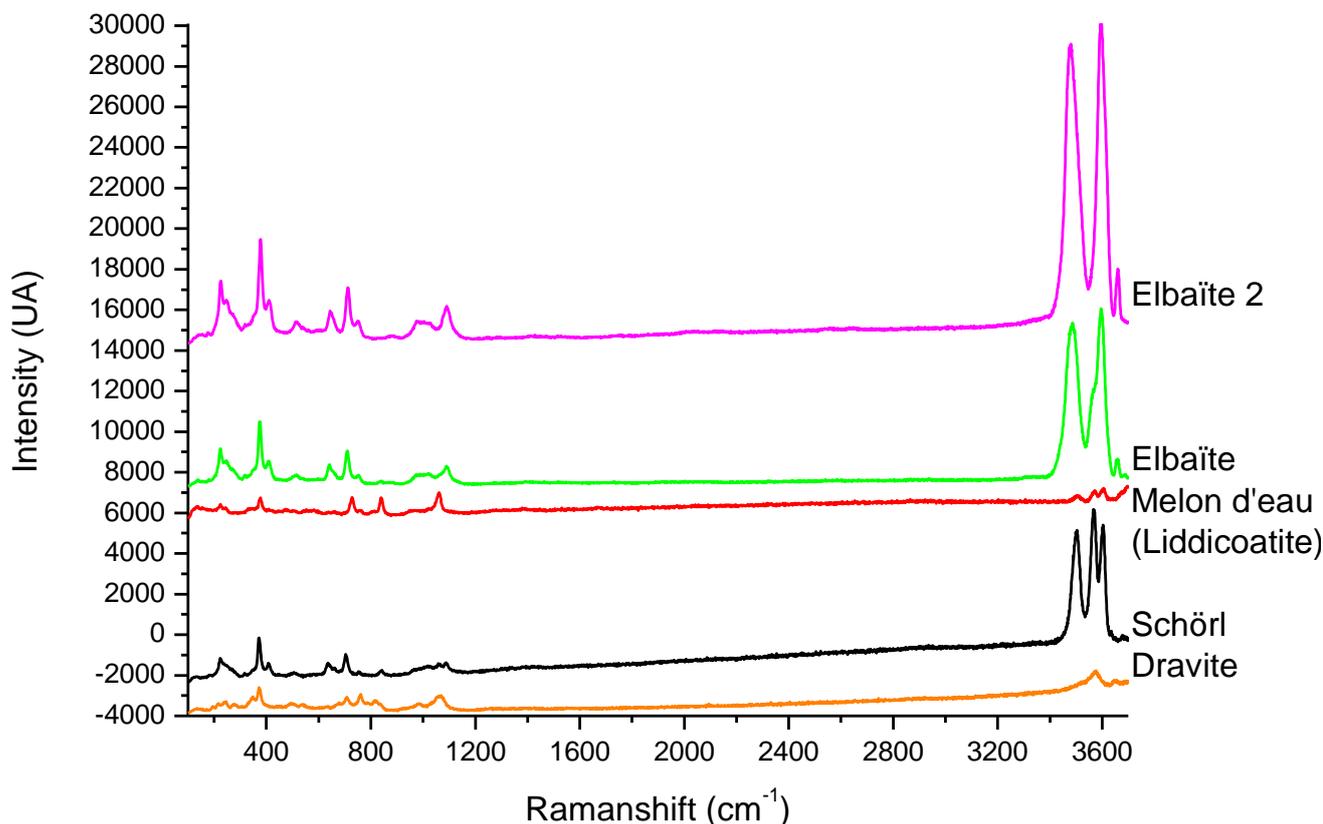


Figure 18: Comparaison des différents spectres de références réalisés à 532 nm. Tourmalines n° 5, 17, 20, 21, et une autre elbaïte non référencée dans ce DUGEM (tableau 3 à 5). De 100-3650cm⁻¹

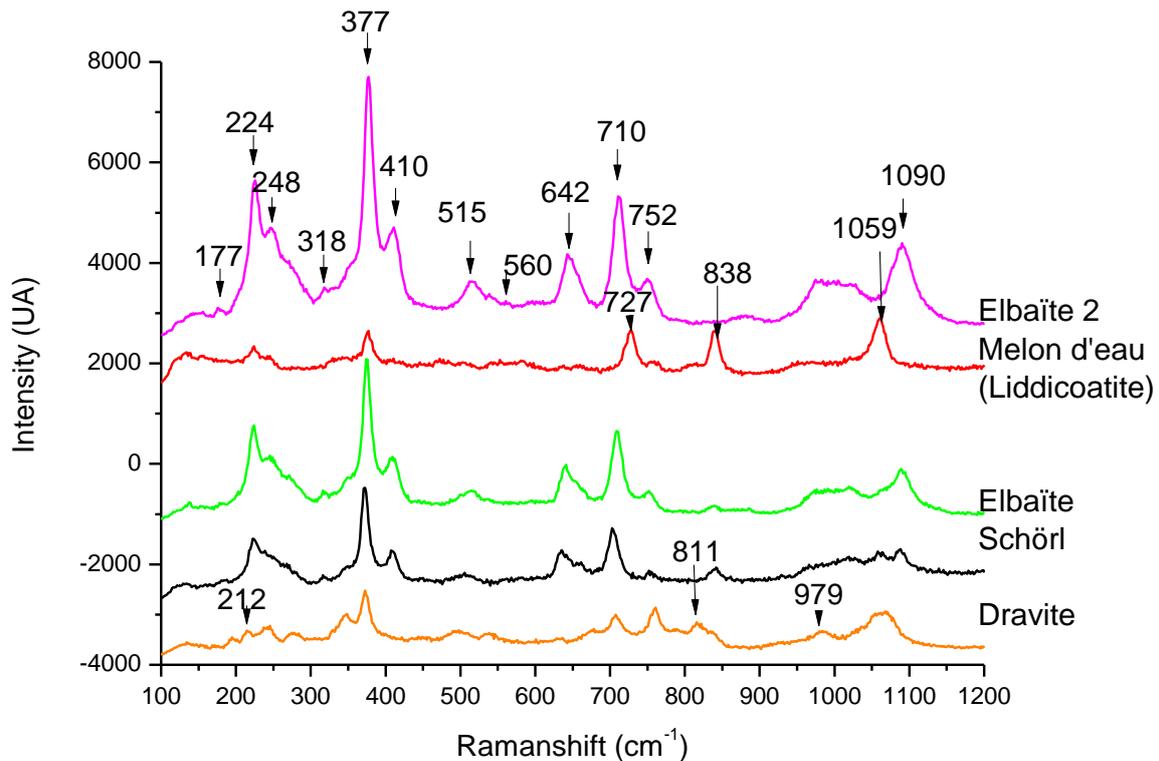


Figure 19 : Comparaison des différents spectres de références réalisés à 532 nm. Zoom sur la partie structurale. Tourmalines n° 5, 17, 20, 21, et une autre elbaïte non référencée dans ce DUGEM (tableau 3 à 5). De 100-1200 cm^{-1} . On retrouve les pics caractéristiques (224, 377, 410, 710-750, 1050-1090 cm^{-1}).

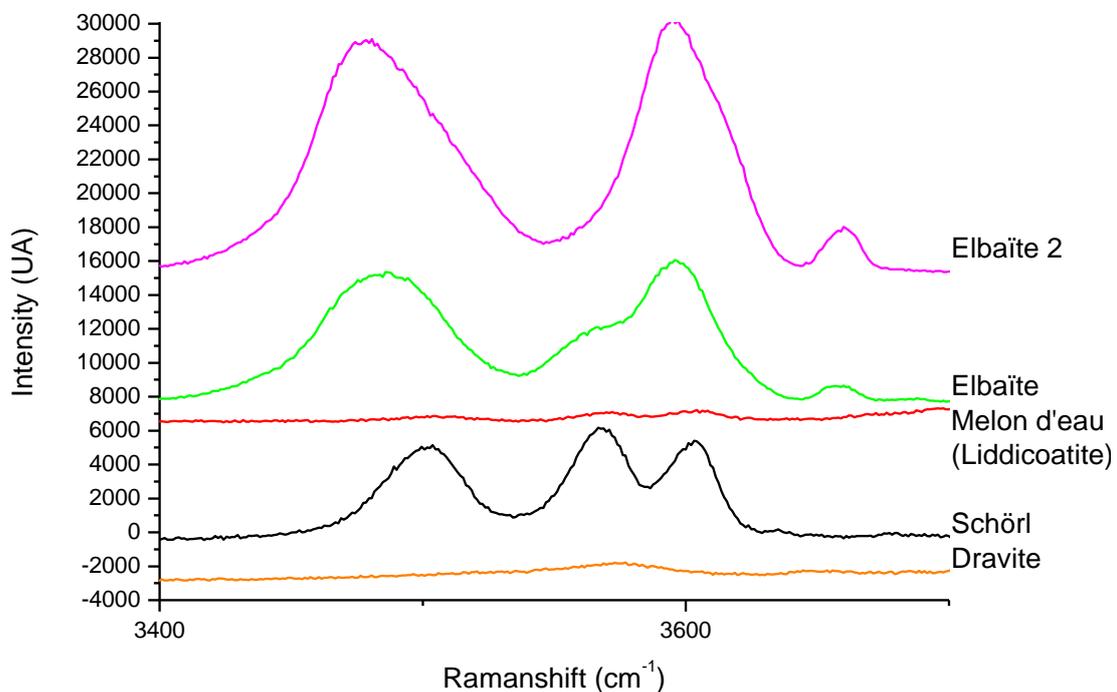
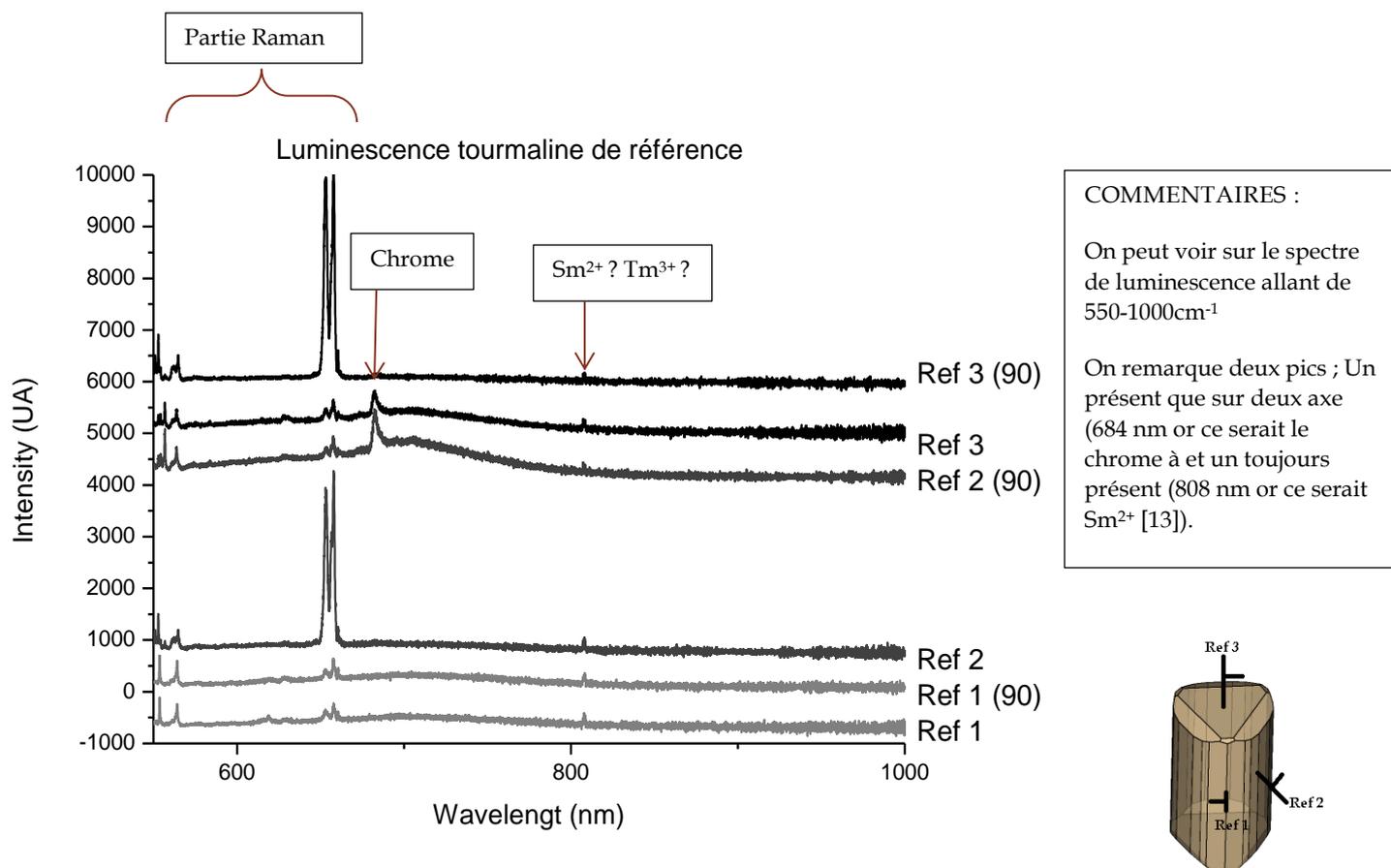


Figure 20: Comparaison des différents spectres de références réalisés à 532 nm. Zoom sur la partie OH. Tourmalines n° 5, 17, 20, 21, et une autre elbaïte non référencée dans ce DUGEM (tableau 3 à 5). On retrouve ainsi les groupements hydratés, présents suivant l'orientation.

LUMINESCENCE

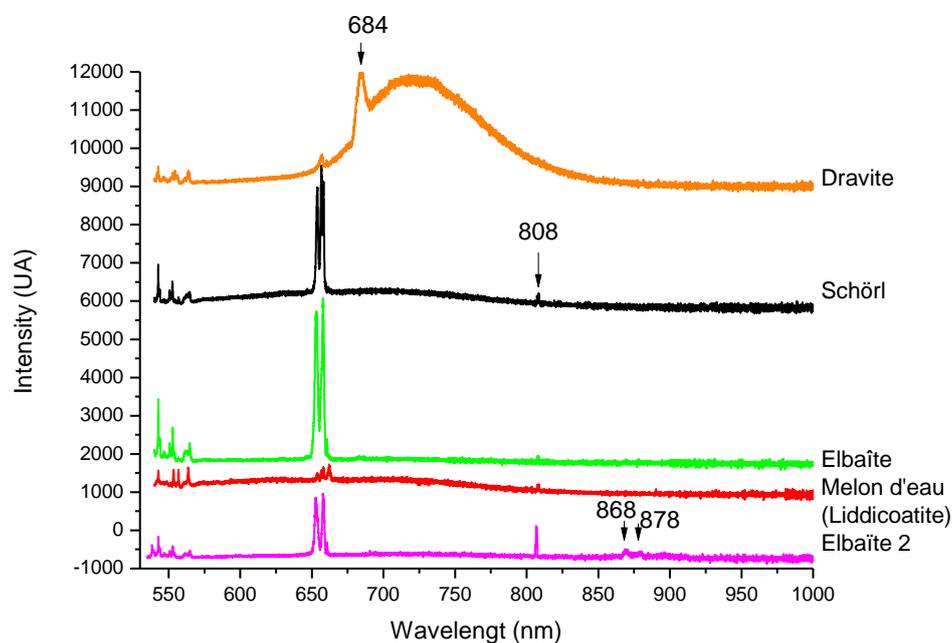


COMMENTAIRES :

On peut voir sur le spectre de luminescence allant de 550-1000cm⁻¹

On remarque deux pics ; Un présent que sur deux axe (684 nm or ce serait le chrome à et un toujours présent (808 nm or ce serait Sm²⁺ [13]).

Figure 21 : Luminescence enregistrée sur les différents axes possibles d'une tourmaline. Réalisé sur le cristal de référence à 532 nm, Chaque axe étant mesuré deux fois avec une rotation de 90 degrés. Tourmaline 21 (tableau 3-5). De 550 à 1000 nm.



COMMENTAIRES :

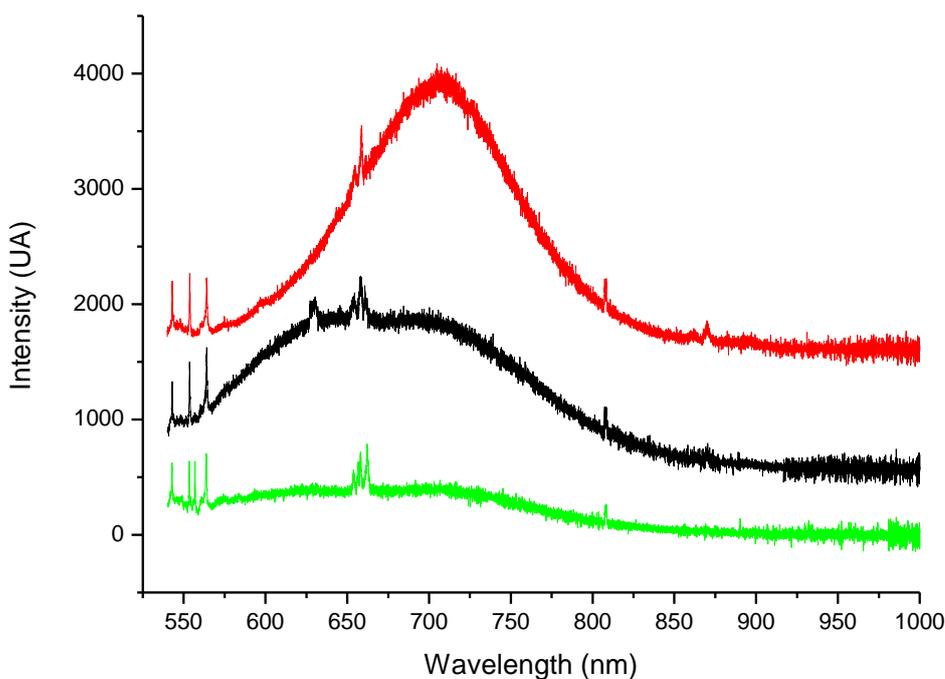
On peut voir sur le spectre de luminescence allant de 550-1000cm⁻¹

On remarque pour la dravite un pic étroit à 684nm, qui correspond au chrome, et une bande large entre 650 et 800nm qui correspond au fer.

Pour les autres, on ne retrouve qu'un pic à 808nm (Sm²⁺ ?).

Enfin pour la liddicoatite on retrouve deux pics à 868 et 878 nm qui semble correspondre au Nd³⁺ [13].

Figure 22 : Spectre de luminescence de la melon d'eau de référence (n°5 tableau 3-5), en vert la zone verte, rouge la zone rouge et noir la zone blanche à 532nm. De 525 à 1000 nm.



COMMENTAIRES :

On peut voir sur le spectre de luminescence allant de 525-1000 cm^{-1}

On remarque que dans la zone rouge, mais aussi dans la zone blanche et très peu dans la verte, que l'on retrouve un pic de fer, ainsi qu'un pic à 808nm Sm^{2+} .

On remarque pour la zone blanche et très peu pour la zone verte une gamme commençant à 550nm de Mn^{2+} ? [13].

Sur la zone rouge seule on retrouve un pic à 870nm pouvant correspondre au Nd^{3+} [13].

Figure 23 : Ensemble des spectres de luminescence des échantillons de référence à 532nm. Tourmalines n° 5, 17, 20, 21, et une autre elbaïte non référencée dans ce DUGEM (tableau 3 à 5). De 550 à 1000 nm.

Spectre Raman : Les raies Raman sont caractéristiques des liaisons, mais l'environnement autour de celles-ci modifie légèrement leur fréquence de vibration. On peut voir sur ces spectres de références qu'il n'existe que de très petites variations entre chaque espèce. On voit surtout des décalages faibles de certains pics, ces décalages doivent être expliqués par le fait que ces espèces forment des séries continues (figure 18, 19, 20). On voit aussi que le spectre Raman du schörl est très proche de celui de l'elbaïte et de la liddicoatite (figure 18, 19), ce qui s'explique par la série continue schörl (point 1059 cm^{-1}) vers l'elbaïte (décalage des groupements OH). On peut aussi voir des similitudes entre les spectres de la schörl et de la dravite. Ceci pouvant aussi s'expliquer par la série continue schörl \rightarrow dravite (212, 811, 979 cm^{-1}) et la quasi absence de groupement OH. Les raies spécifiques trouvées avec ces échantillons de tourmaline sont : 222, 375, 409, 710-750, 1050-1090 cm^{-1} .

Pour pouvoir répondre de la faible différence entre l'elbaïte et la melon d'eau, j'ai téléchargé des analyses réalisées par RUFF sur une Fluor-liddicoatite (RRUFF ID : R060969.2) (figure 24). Cette tourmaline a été identifiée de façon précise par diffraction X. On voit ainsi que son spectre Raman est proche des melons d'eau, or à Madagascar, d'où proviennent mes deux melons d'eau, il y a beaucoup de liddicoatite. Il semble donc qu'il faut les interpréter ainsi : La melon d'eau étudiée est donc une liddicoatite.

On a ainsi la dravite, la melon d'eau (liddicoatite) et la série schörl \Rightarrow elbaïte et la liddicoatite qui semblent être déterminables facilement par Raman. (Figure 18, 19, 20, 24).

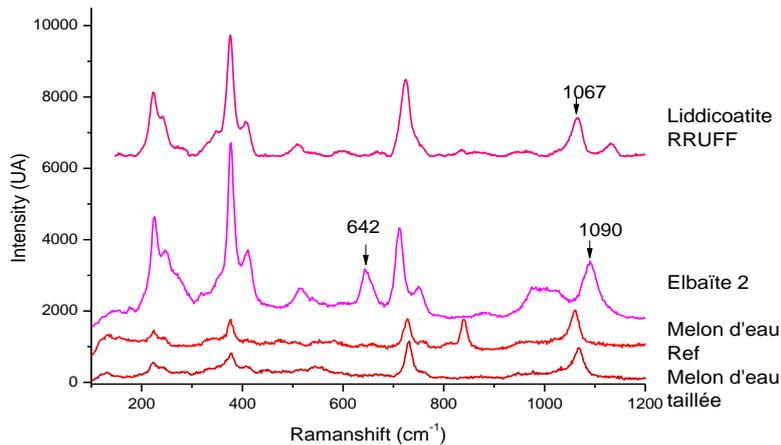


Figure 24 : Comparaison des spectres de diffusion Raman pour les liddicoatite et les elbaïte à 532nm, spectre RRUFF d'une liddicoatite identifiée par diffraction X. Tourmalines n° 5, 21, et une autre elbaïte non référencée dans ce DUGEM (tableau 3 à 5). De 100 à 1200 cm^{-1} .

Résultats luminescence (figure 21, 22, 23): On a la présence pour les petites longueurs d'ondes de pics Raman, mais au-delà on peut voir des phénomènes de luminescence, et plus particulièrement pour la dravite (figure 23) un pic très important à 684 nm que l'on ne retrouve pas sur les autres tourmalines, or ce pic apparaît sur le cristal de référence (ref 2 (90) et ref 3) (figure 21) ce qui montre un élément de la structure qui n'est pas visible suivant les autres plans. Avec la luminescence on ne peut donc, que voir de façon précise les pics typiques des tourmalines (653, 657, 684, 808 nm). Il semble donc impossible avec ces spectres d'identifier les différentes espèces ou séries.

ABSORBANCE

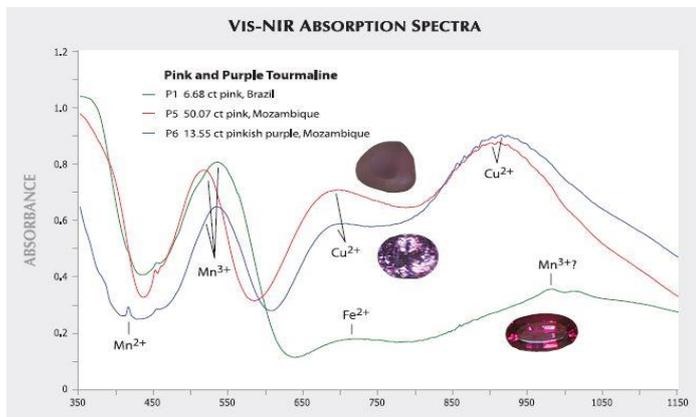


Figure 25: Exemple de spectre de référence issue de l'article Paul B. Merkel and Christopher M. Breeding (2009).

Résultats d'absorbance de référence (figure 25 et 26) : les spectres ont été normalisés pour avoir des comparaisons plus simples. On peut voir dans les petites et les grandes longueurs d'ondes la présence de pics, qui diffèrent légèrement suivant les espèces de tourmalines. Le problème étant que certaines raies peuvent ne pas apparaître, si elles sont cachées ou de trop faibles importances. Il me restera donc, à trouver à quoi correspondent ces petites raies, ce que j'ai fait avec la comparaison des données de Merkel et al (2009) [14].

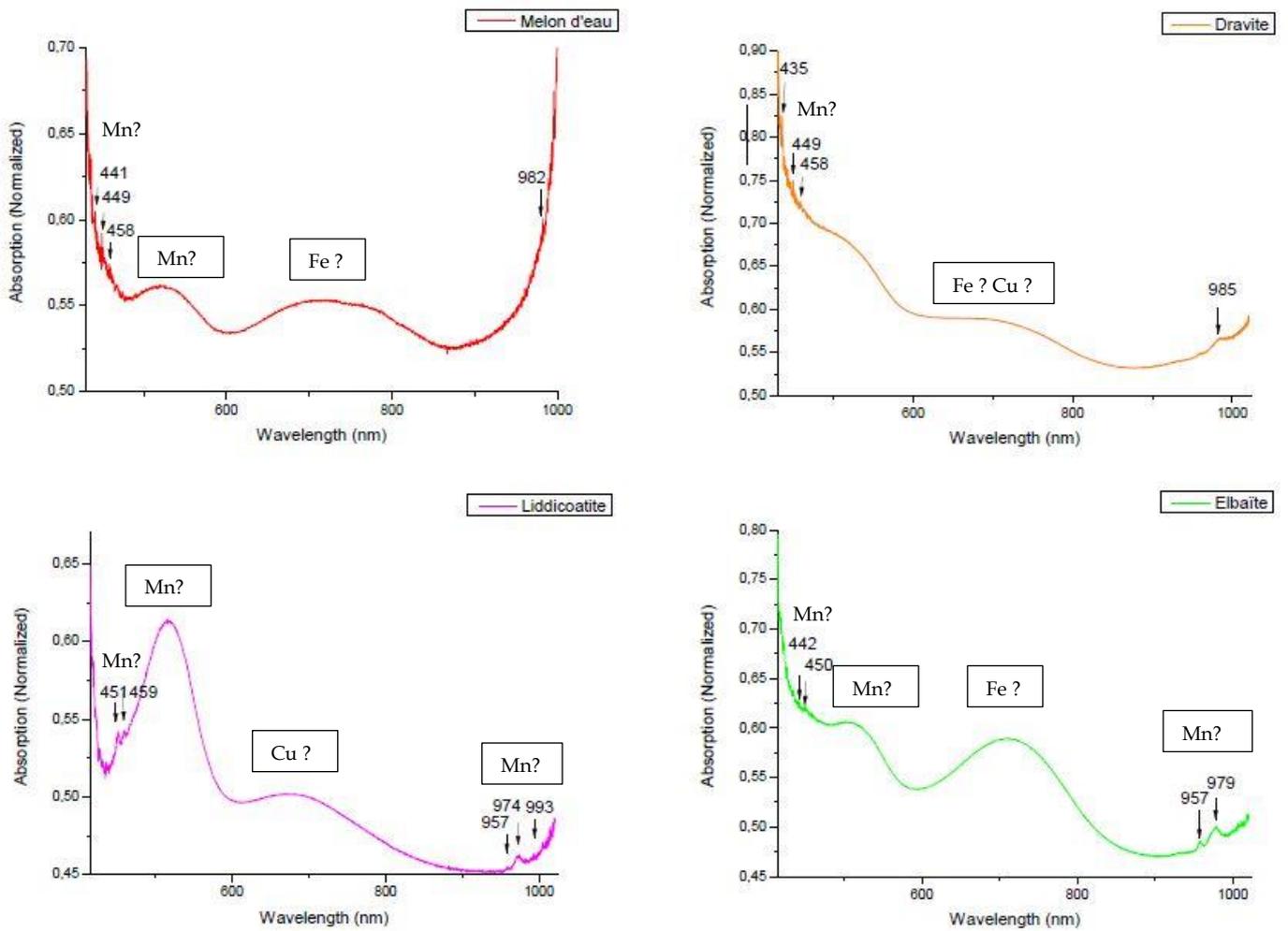


Figure 26 : Spectre d'absorbance des échantillons de référence. Tourmalines n° 5, 17, 20, 21, et une autre elbaïte non référencée dans ce DUGEM (tableau 3 à 5). [14]

RESULTATS D'AUTRES TOURMALINES

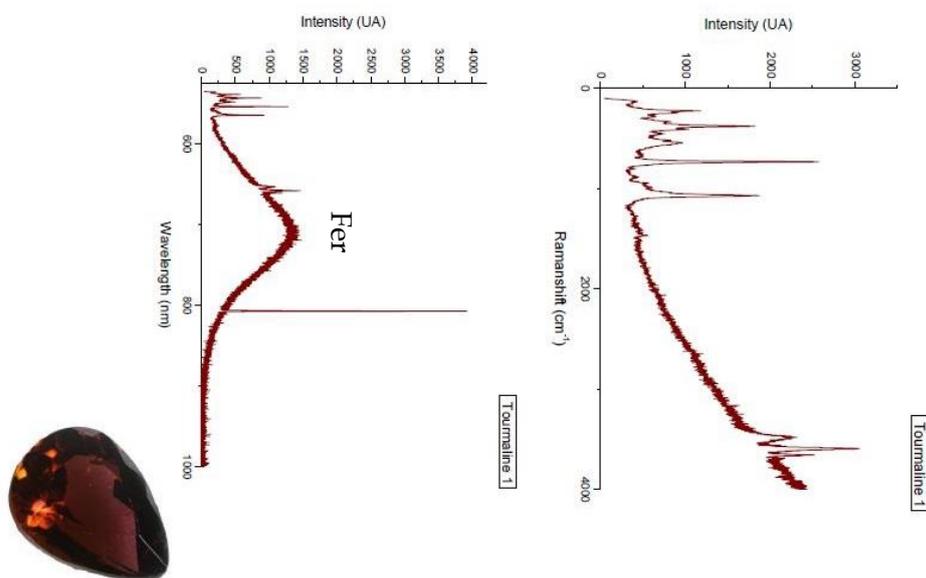


Figure 27 : Résultat de spectrométrie Raman et luminescence de la tourmaline 1

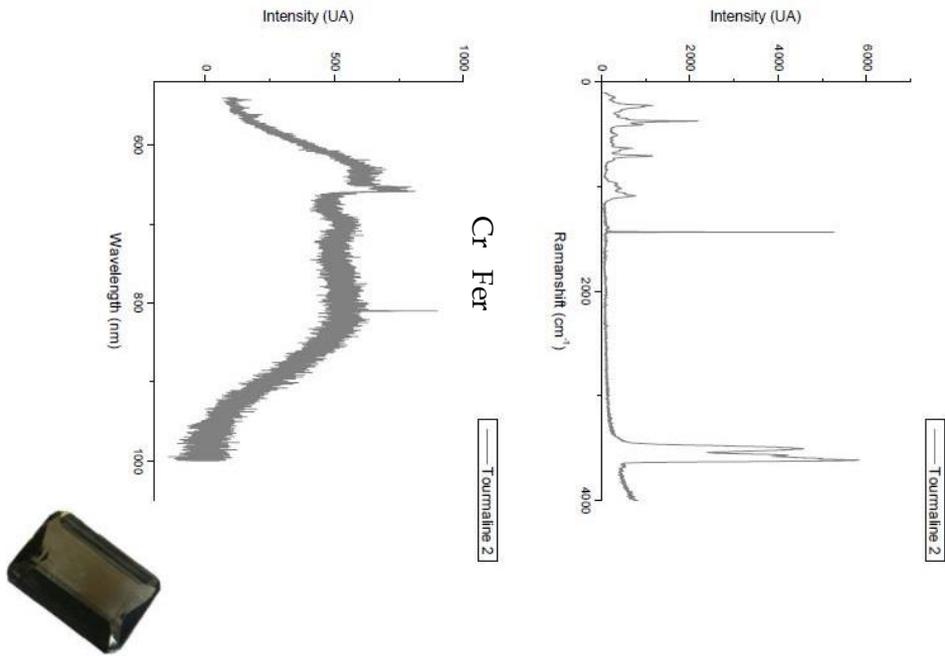


Figure 28 : Résultat de spectrométrie Raman et luminescence de la tourmaline 2

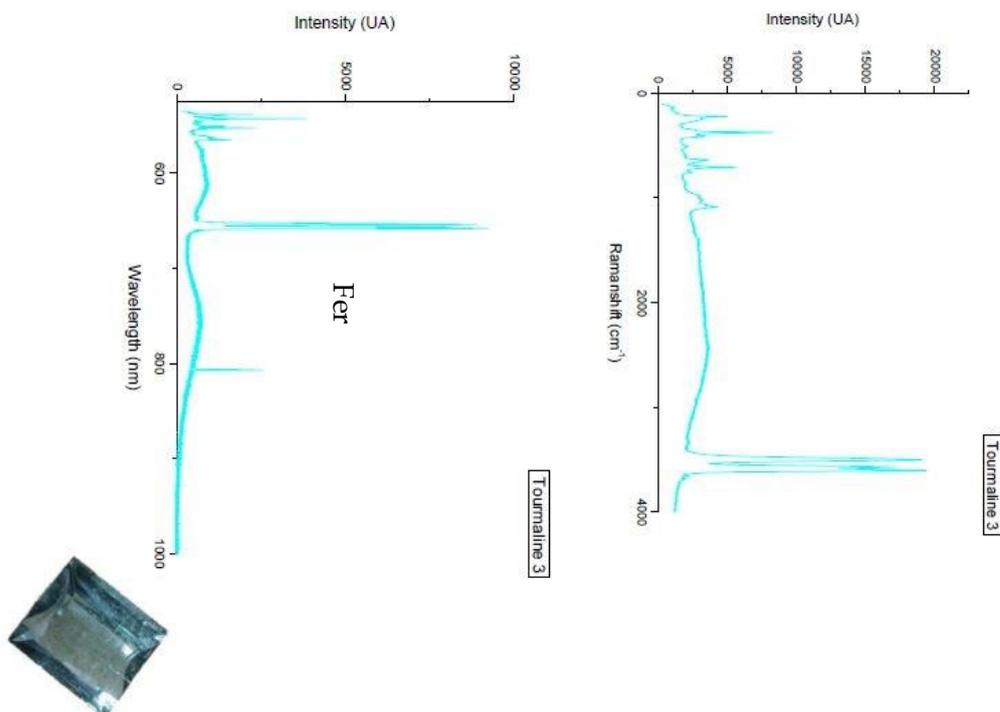


Figure 29: Résultat de spectrométrie Raman et luminescence de la tourmaline 3

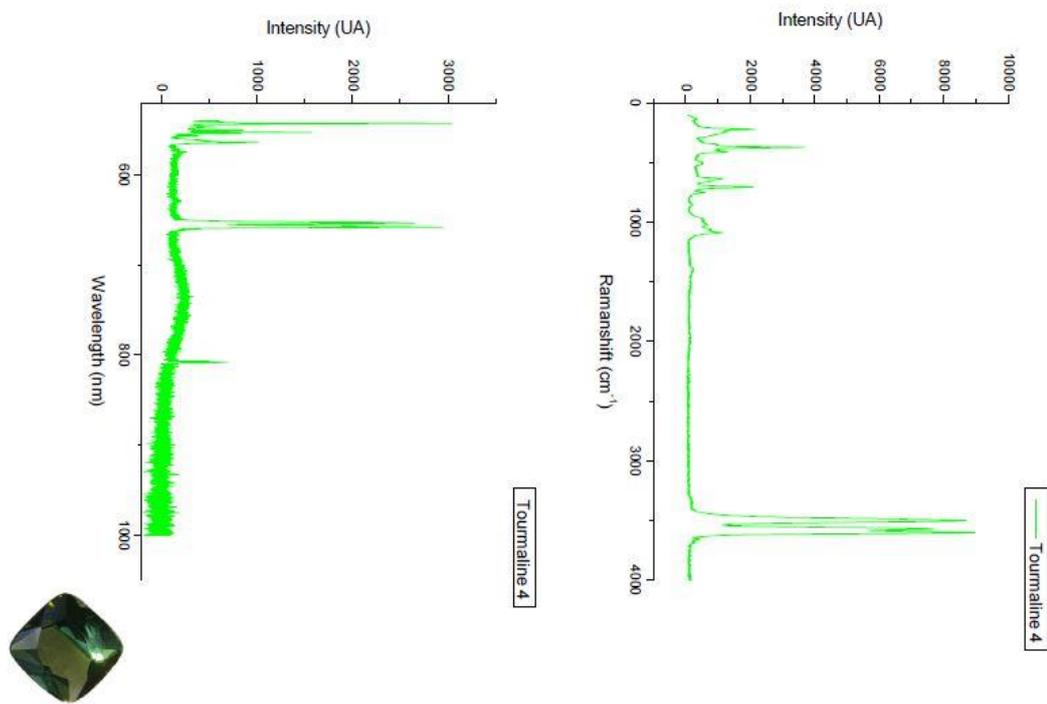


Figure 30: Résultat de spectrométrie Raman et luminescence de la tourmaline 4

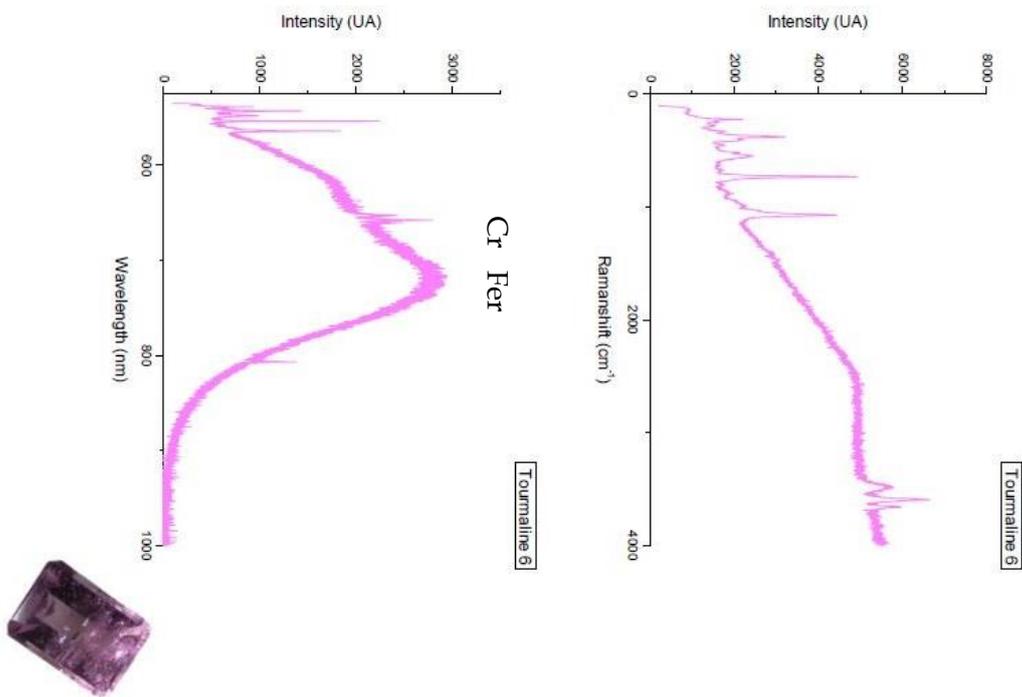


Figure 31: Résultat de spectrométrie Raman et luminescence de la tourmaline 6

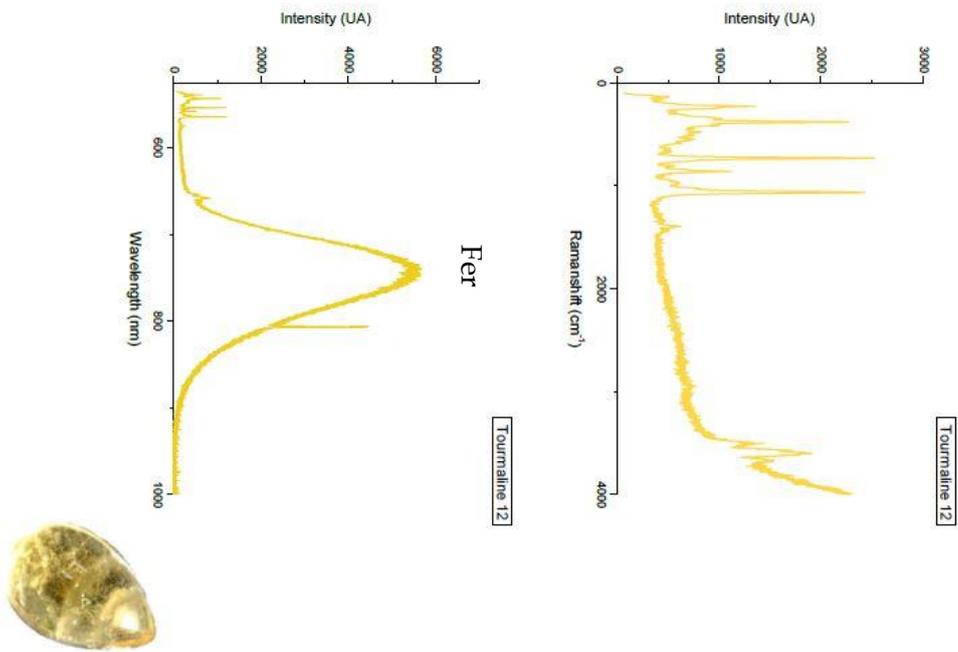


Figure 32 : Résultat de spectrométrie Raman et luminescence de la tourmaline 12

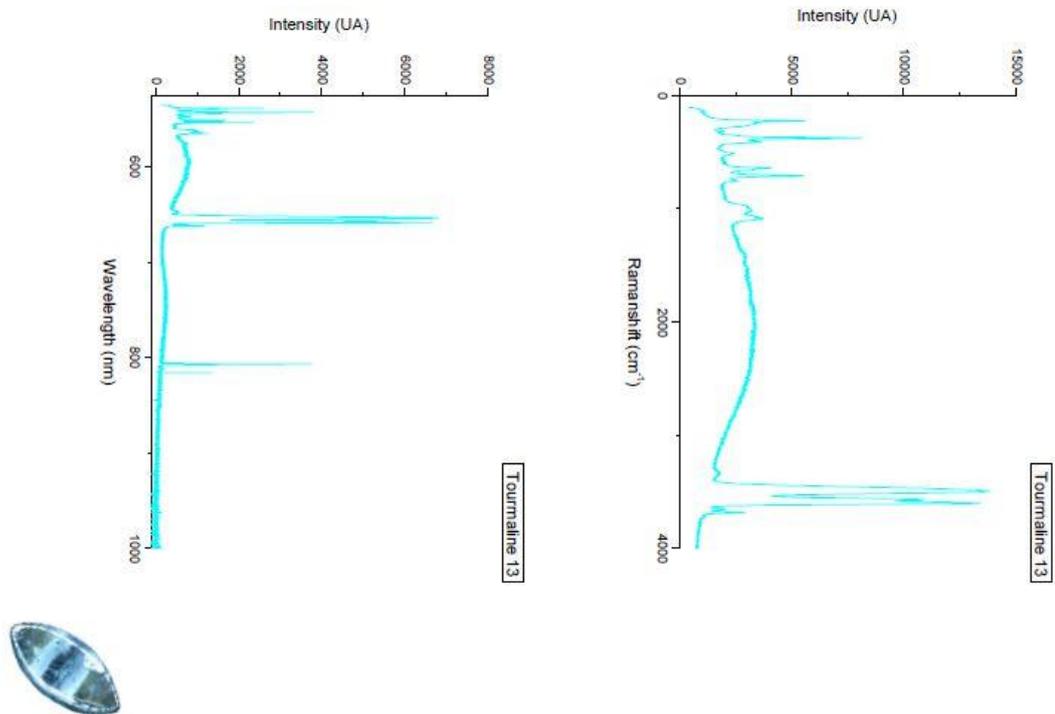


Figure 33: Résultat de spectrométrie Raman et luminescence de la tourmaline 13

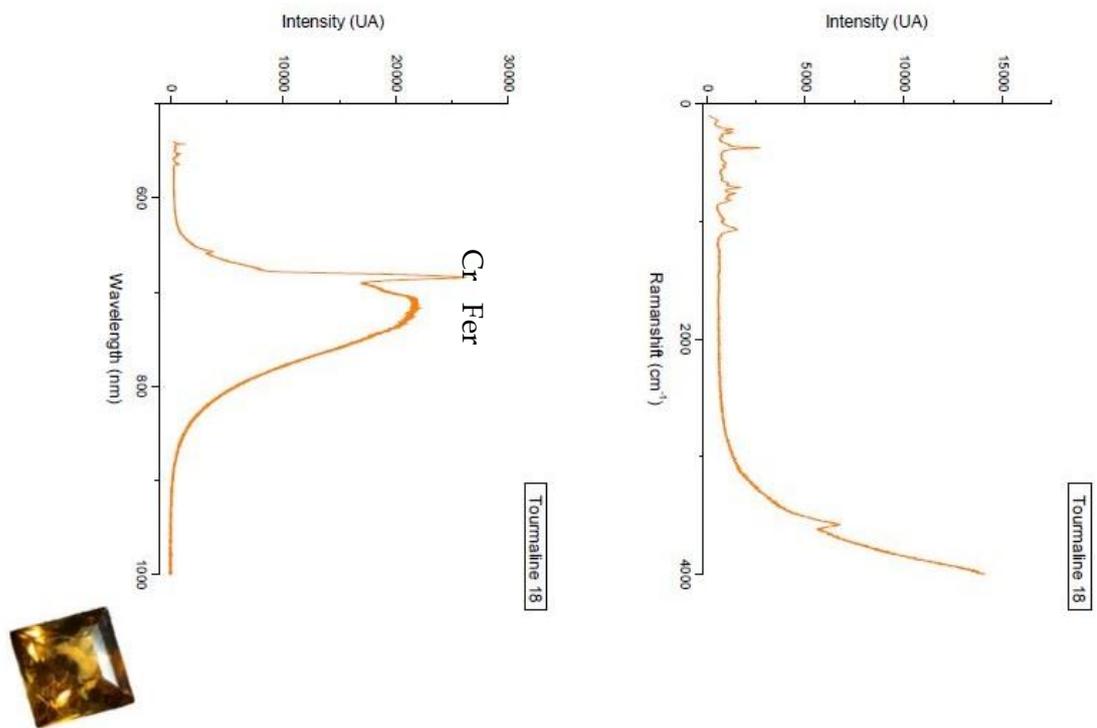


Figure 34 : Résultat de spectrométrie Raman et luminescence de la tourmaline 18

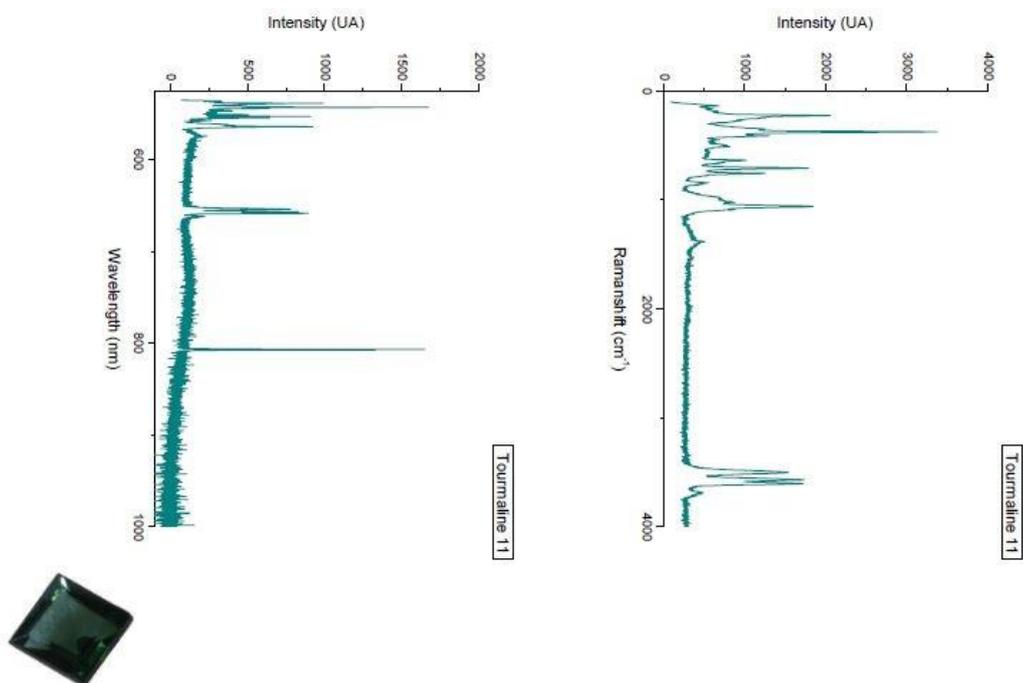


Figure 35: Résultat de spectrométrie Raman et luminescence de la tourmaline 11

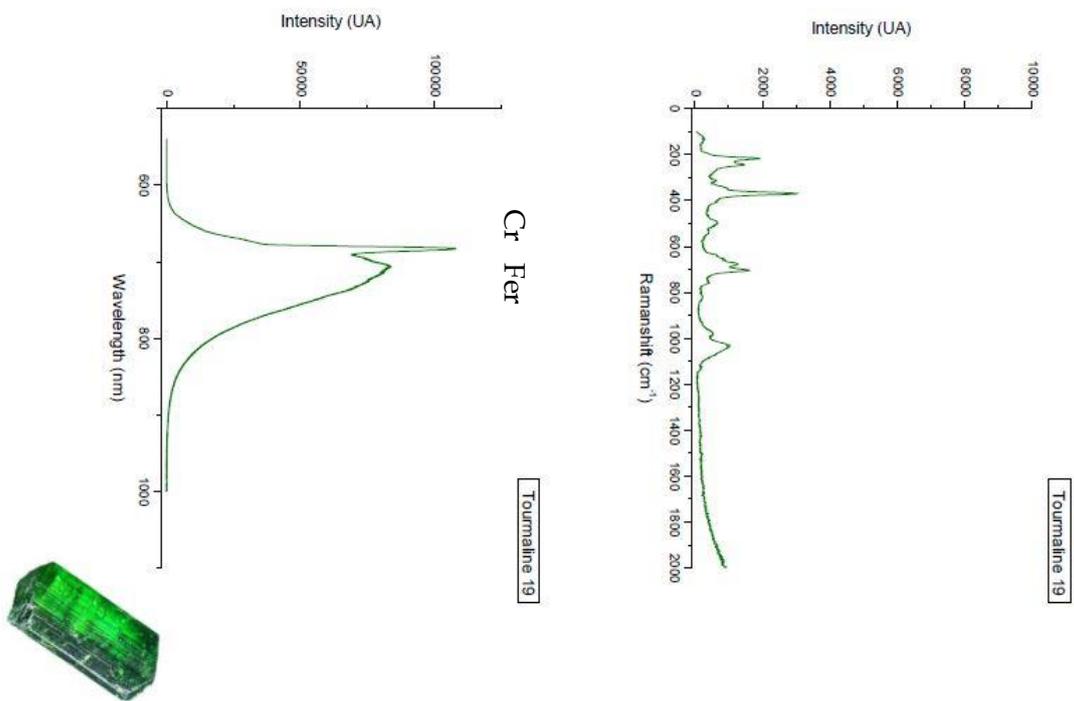


Figure 36 : Résultat de spectrométrie Raman et luminescence de la tourmaline 19

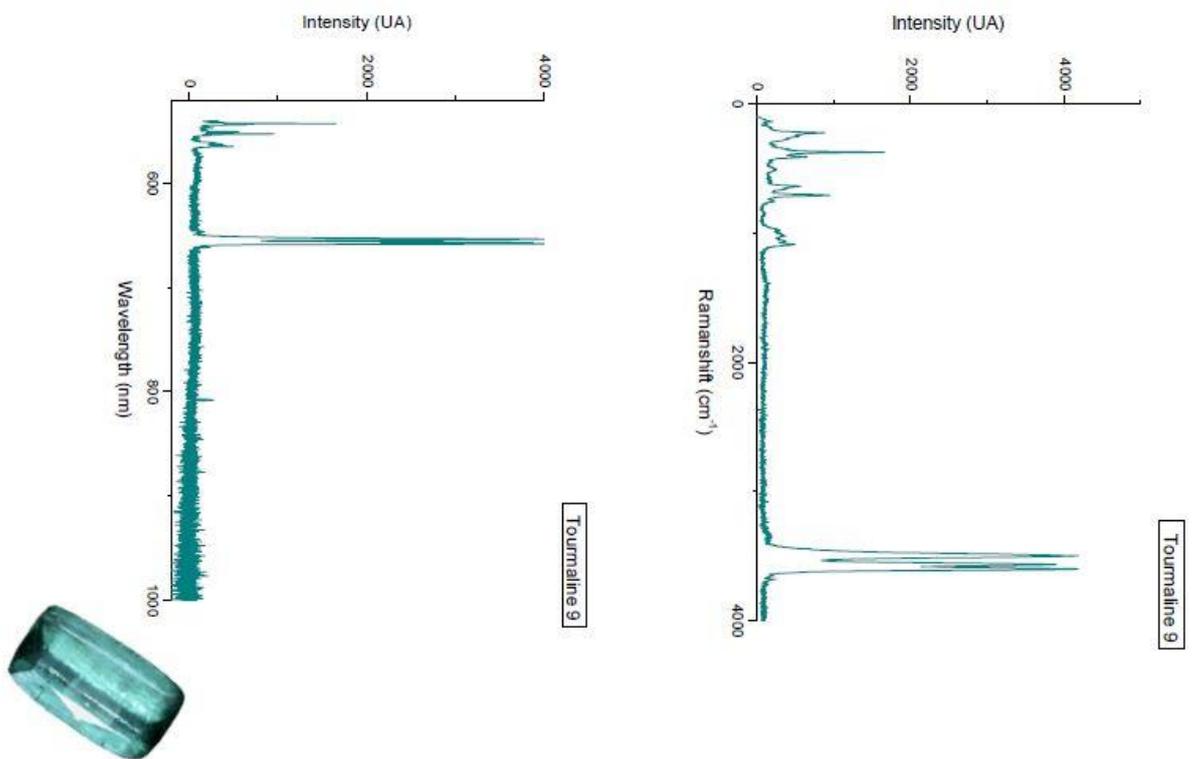


Figure 37 : Résultat de spectrométrie Raman et luminescence de la tourmaline 9

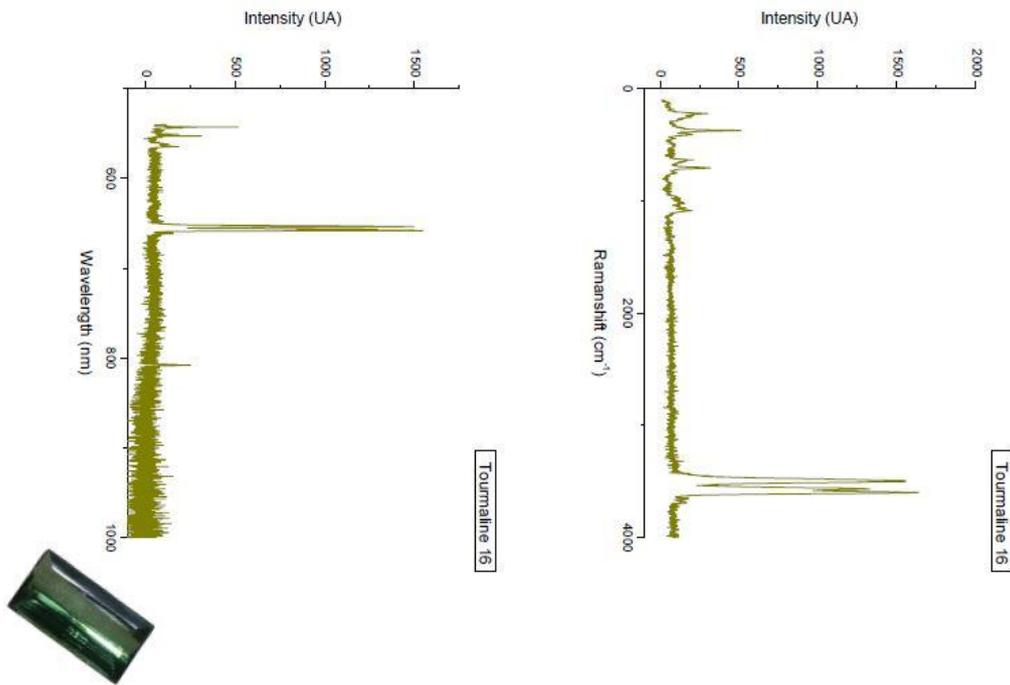


Figure 38 : Résultat de spectrométrie Raman et luminescence de la tourmaline 16

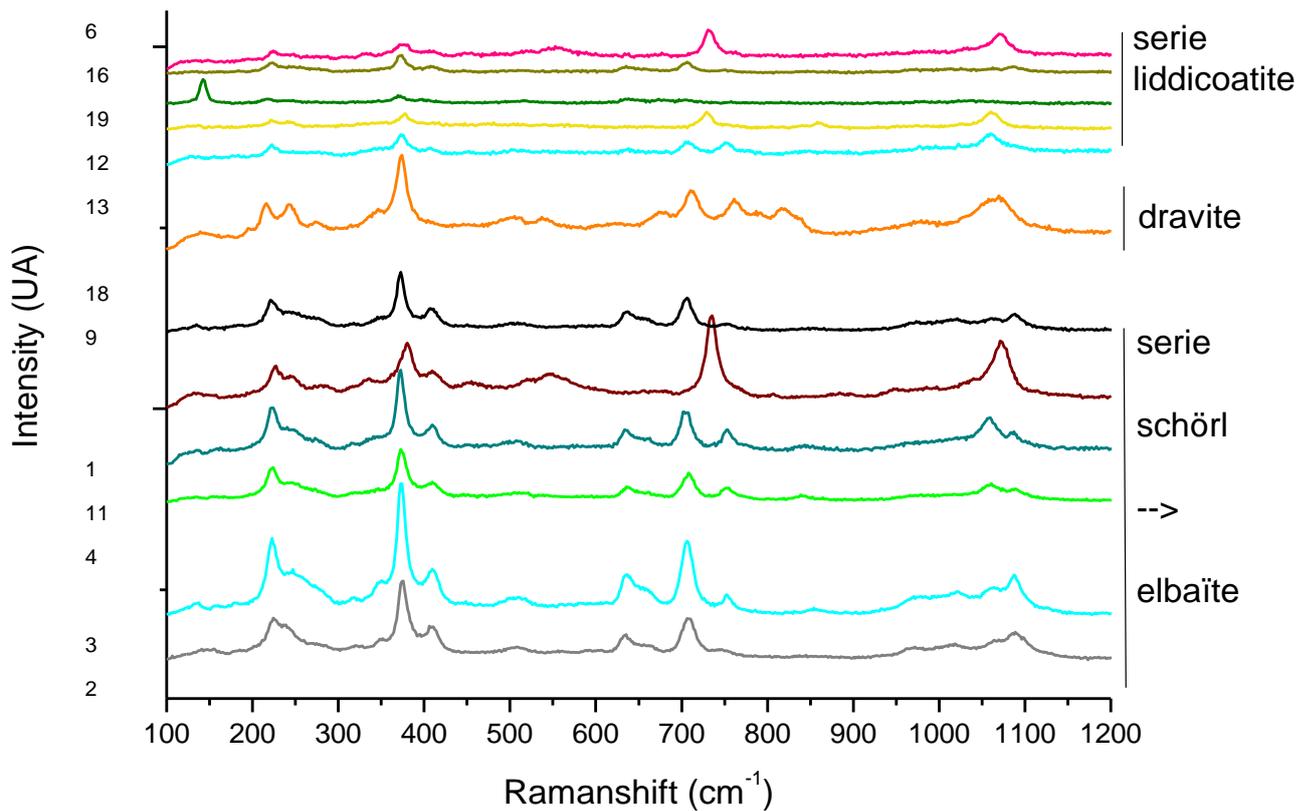


Figure 39 : Ensemble des spectres de diffusion Raman des tourmalines analysées, et comparaisons avec les espèces de références, ou avec une série continue. Tourmalines 1, 2, 3, 4, 6, 9, 11, 12, 13, 16, 18, 19 (tableau 3-5). On retrouve les pics caractéristiques (222, 375, 409, 710-750, 1050-1090 cm^{-1}) et des pics spécifiques aux espèces que j'ai essayé ici d'ordonner.

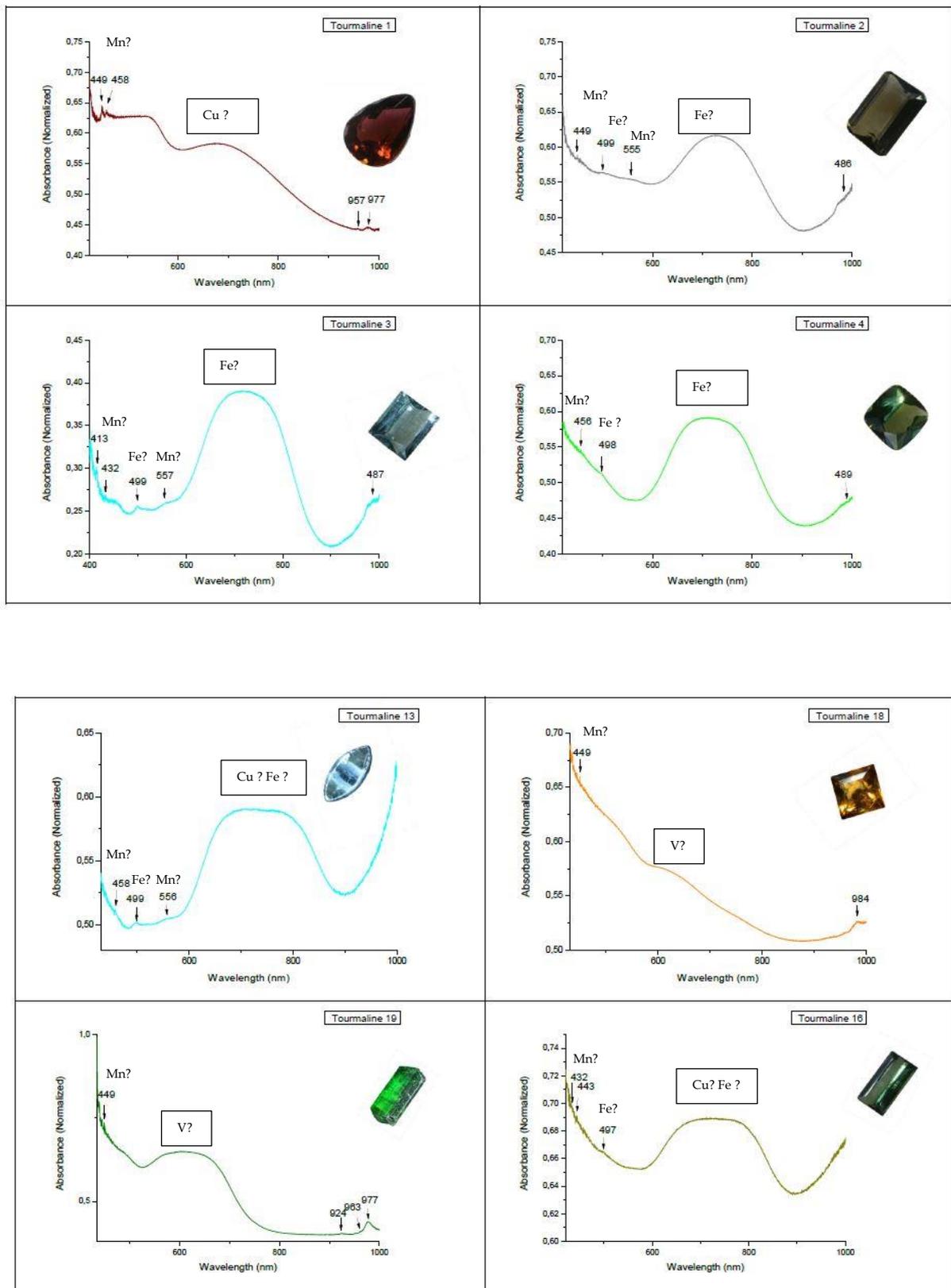


Figure 41 : Résultats de l'absorption pour les autres tourmalines analysées. Tourmalines n°1, 2, 3, 4, 13, 16, 18, 19. [14]

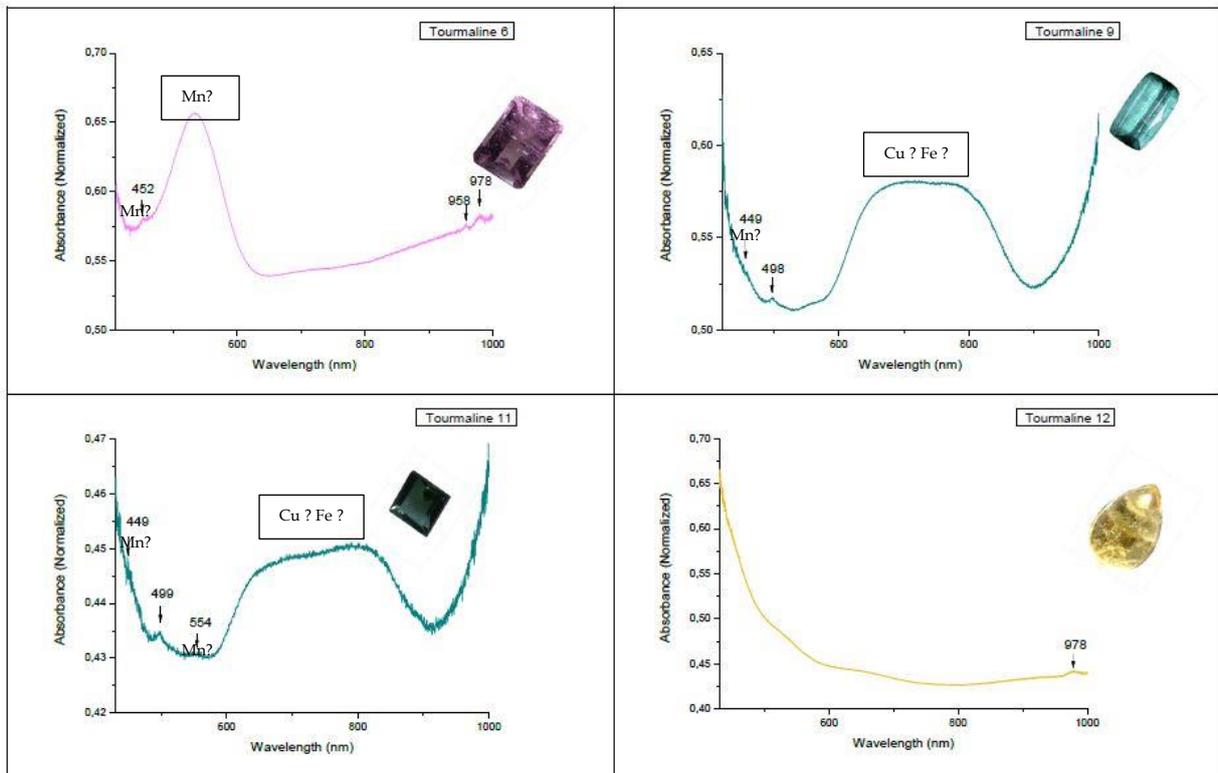


Figure 40 : Résultats de l'absorption pour les autres tourmalines analysées. Tourmalines n°6, 9, 11 et 12. [14]

Résultat diffusion Raman (figure 27 à 38) : On peut regrouper les différents spectres des tourmalines analysées par « types ». On a ainsi une idée à quelle espèce elles appartiennent, ou au moins à quelle série continue (figure 39).

Résultats luminescence (figure 27 à 38) : On peut voir des spectres semblables qui peuvent se regrouper par paquet, tourmalines 12-18-19, 9-16-11-13-4-3 et 1-2-6. On peut poser l'hypothèse que ces ressemblances pourraient nous apporter un critère de détermination plus précis à combiner avec les autres résultats. On a aussi pu retrouver de nombreuses fois la présence du fer, chrome, ... et d'éléments plus particuliers tels que Nd et Sm. On remarque aussi que presque toutes les tourmalines possèdent un pic à 808nm (Sm²⁺ ? Tm³⁺ ?).

Absorbance : On retrouve souvent le fer, le manganèse et le cuivre, plus rarement le vanadium.

Absorption, spectre Raman et luminescence dans le domaine du visible (figure 40 et 41) : On peut voir sur ces différents spectres ainsi que sur ceux de références (figure 25 et 26), qu'au début et à la fin de chacun, de 430 à 500 nm et de 950 à 1000 nm on a les mêmes pics qui sont présents ou légèrement cachés par une absorbance plus forte. On peut aussi voir que les formes des spectres, malgré des couleurs différentes se regroupent. On a la tourmaline 1-6-12-19 (liddicoatite, elbaïte), 18-4-3-2 (dravite de référence, melon d'eau) et 16-13-11-9 (schörl) qui présentent des points similaires. On peut émettre l'hypothèse que ce sont les mêmes éléments chromophore qui rentrent en compte dans ces tourmalines, et la possibilité que ces éléments soient caractéristiques de certaines espèces de tourmalines. Il semble ainsi que l'on retrouve généralement Mn, Fe, et Cu (parfois V) en éléments chromophore dans les tourmalines étudiées.

Les variations entre les différents spectres sont très encourageant et devons être validé par une étude des éléments caractéristiques des pôles purs.

RESULTATS DES LAMES MINCES

LAME MINCE 1

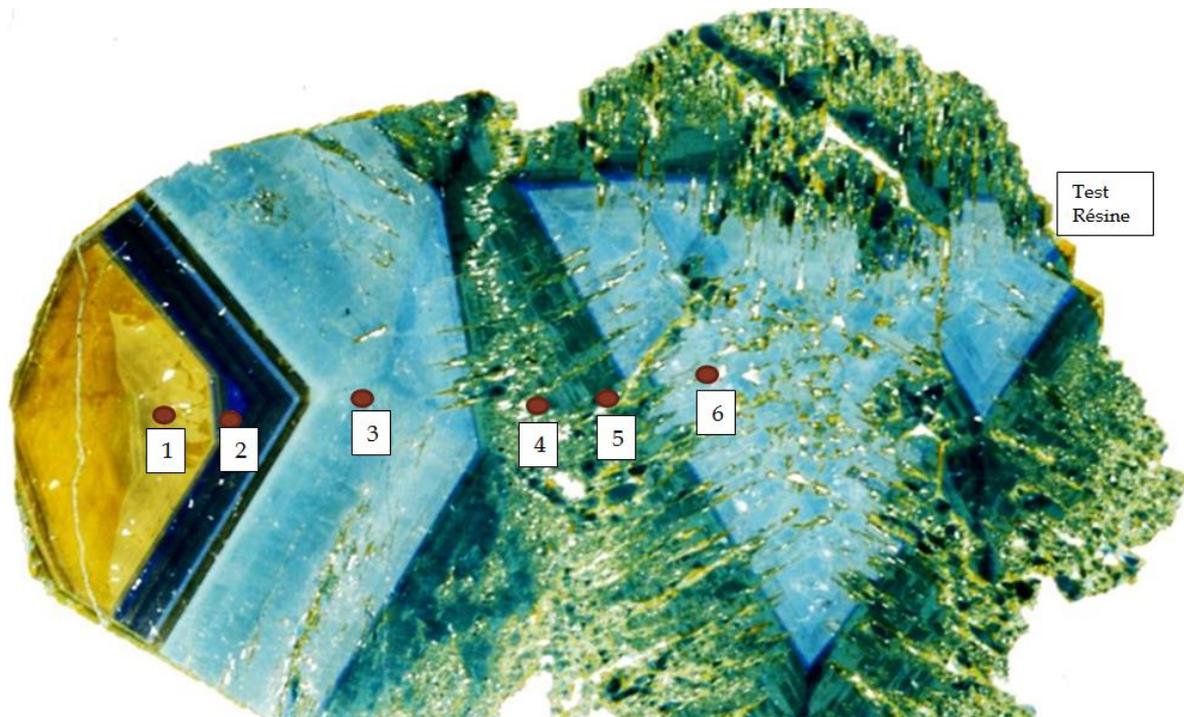


Photo 2: Scan de la lame mince 1 de la tourmaline analysée, avec les points de mesure 1 à 6. Photo d'une lame mince standard (cristal d'environ 3 cm de long). Un test de mesure sur la résine a aussi été faite pour éliminer tout doute sur les analyses.

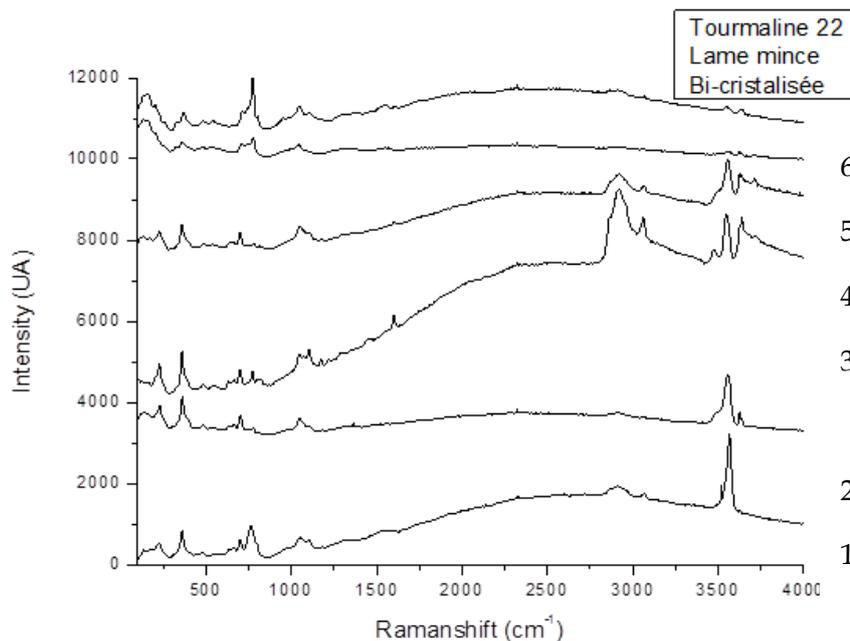


Figure 42 : Spectre Raman des zones marquées sur la photo 2, lame mince 1 de la tourmaline. Point 1 à 6 de bas en haut. Entre 420 et 4000 cm^{-1} . On retrouve les groupements hydratés, et les pics caractéristiques de la tourmaline (375, 710-750, 1050-1090 cm^{-1}). Les pics aux alentours de 2700-3100 cm^{-1} peuvent être liés à la résine.

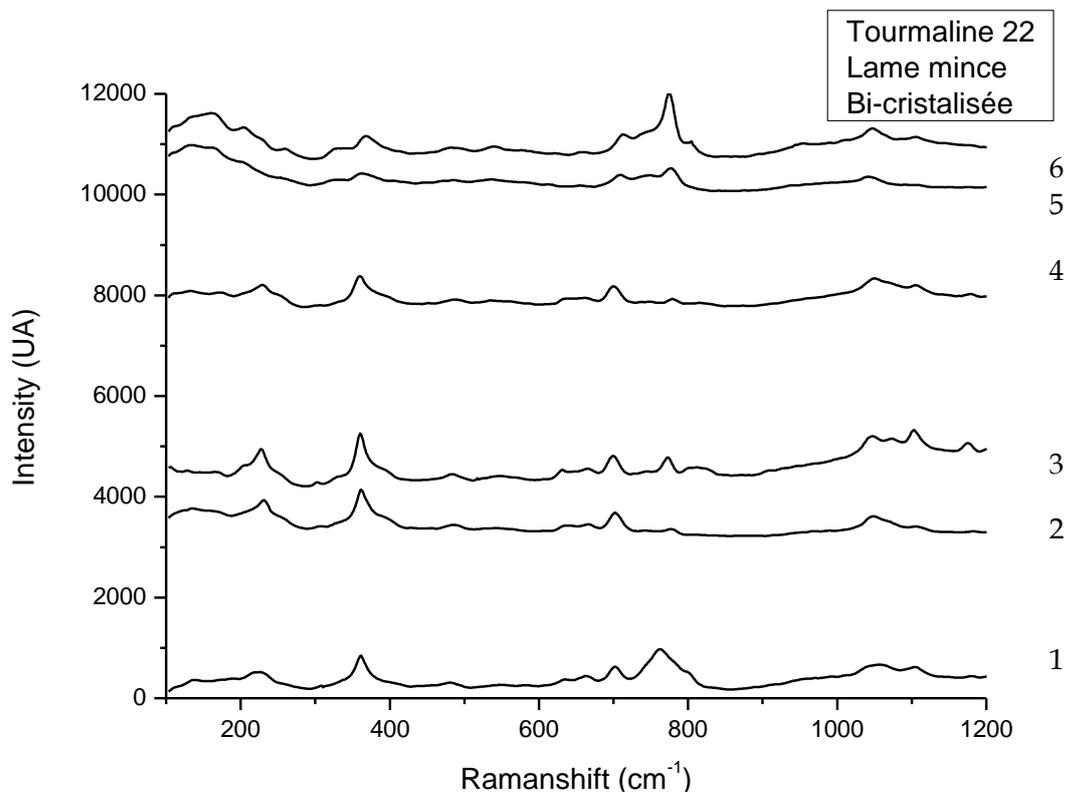


Figure 43 : Spectre Raman, zoom sur la partie structurale (voir photo 2) à 473 nm de 100 à 1200 cm^{-1} . On retrouve les pics caractéristiques de la tourmaline (222, 375, 710-750, 1050-1090 cm^{-1}).

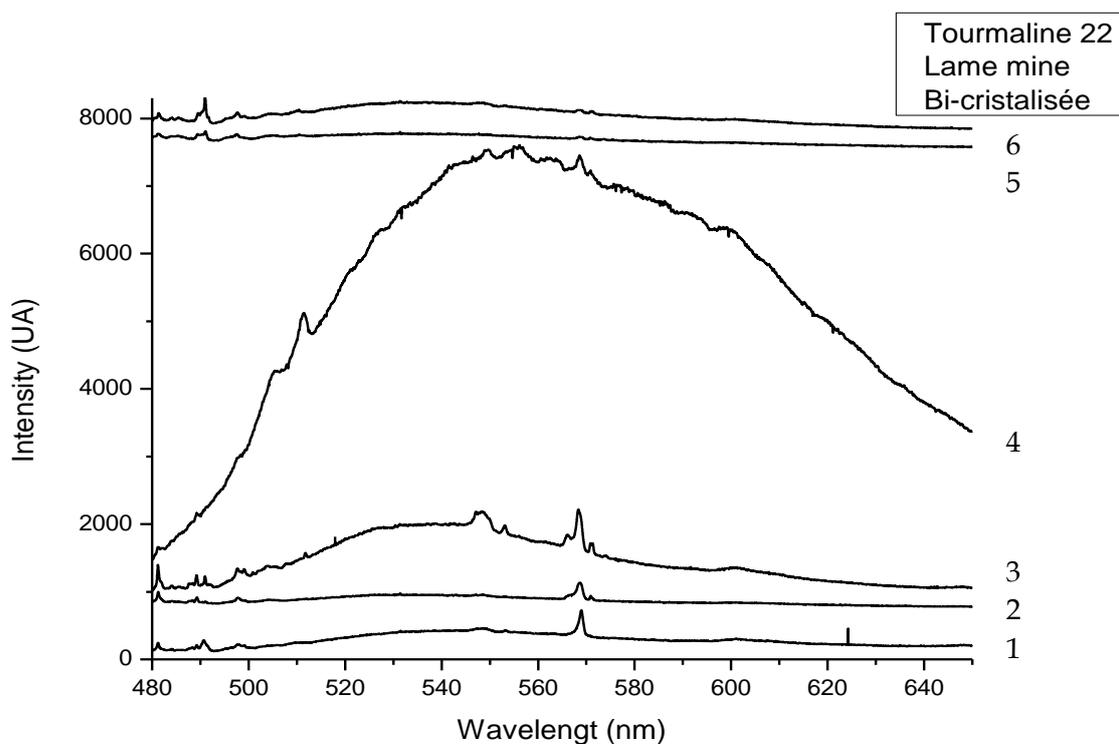


Figure 44 : Spectre de luminescence de la lame mince 1 de tourmaline à 473nm de 480 à 700 nm. On observe pour le 4^{ème}pics une forte luminescence qui doit être liée à la résine ou au Mn.

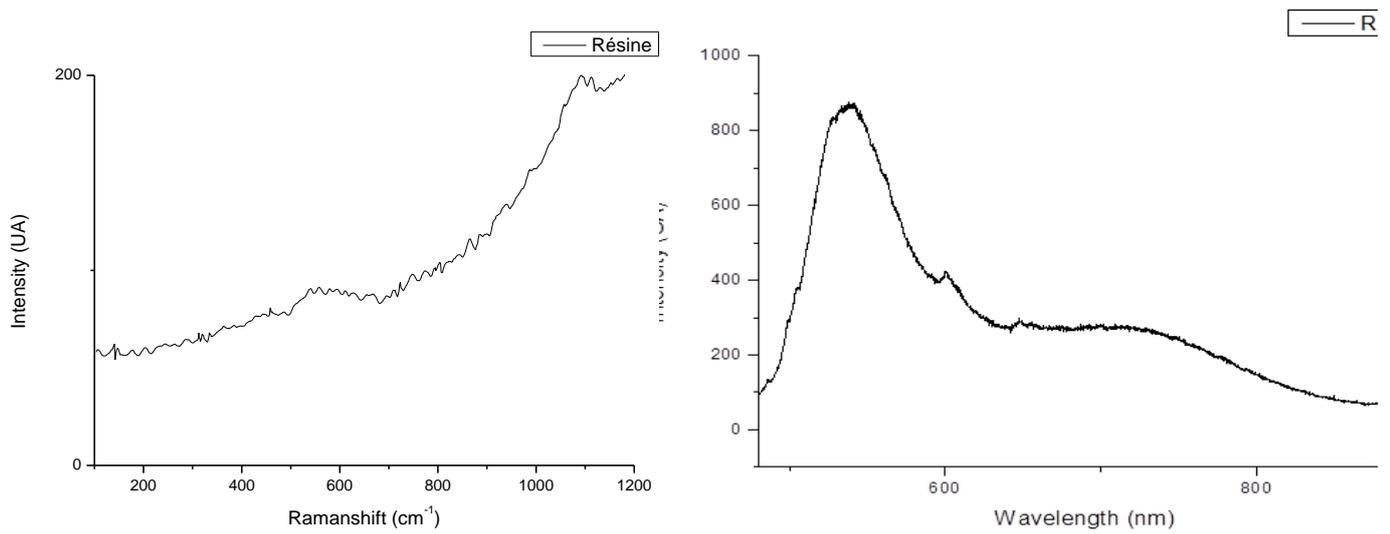


Figure 45 : Spectre de diffusion Raman et de luminescence de la résine

LAME MINCE 2

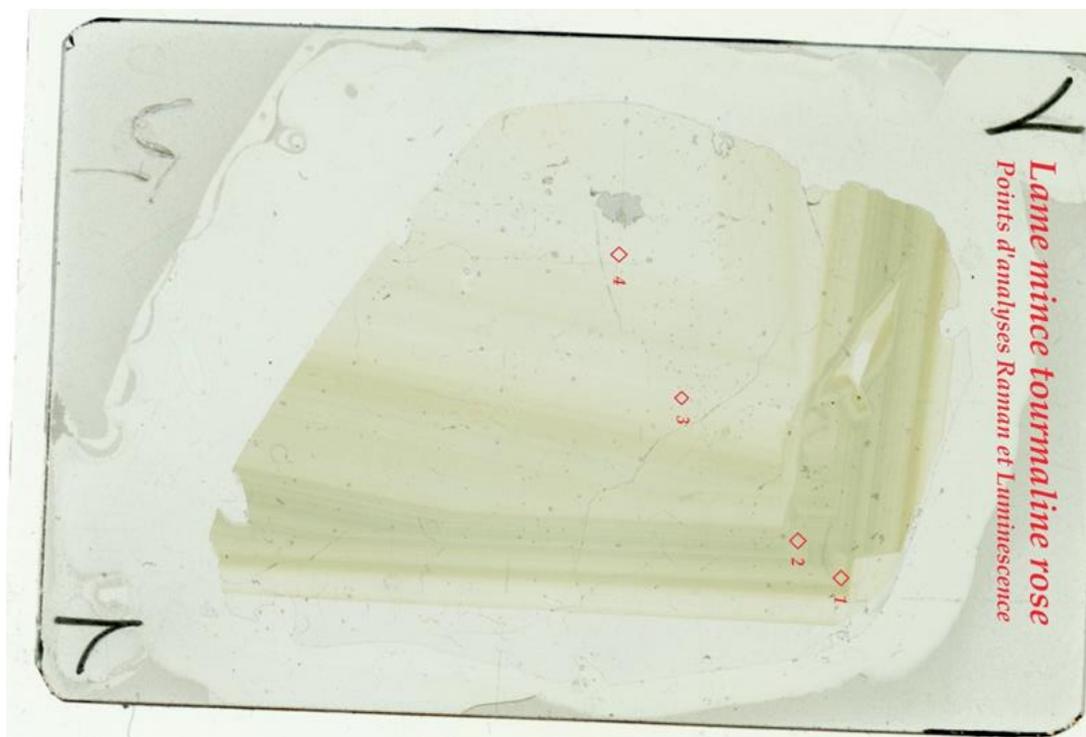


Photo 3 : Scan de la lame mince 2 de tourmaline avec les points de mesure de 1 à 4. Photo d'une lame mince standard.

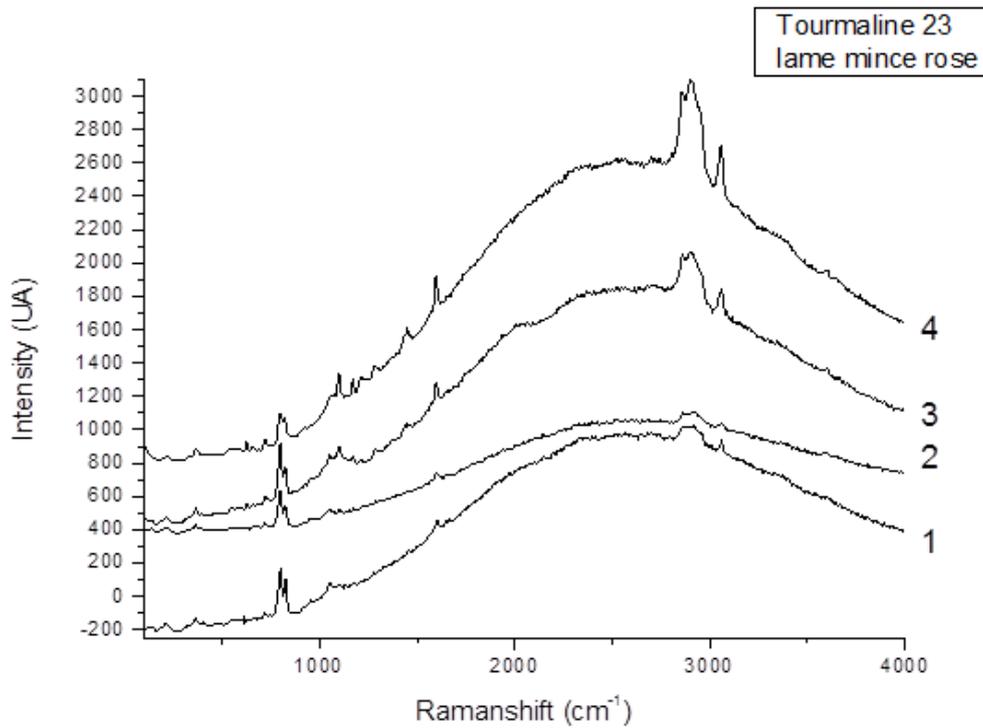


Figure 46: Spectres Raman compilés de la lame mince 2 (voir les points de mesure sur la photo 3) de 850 à 4000 cm^{-1}

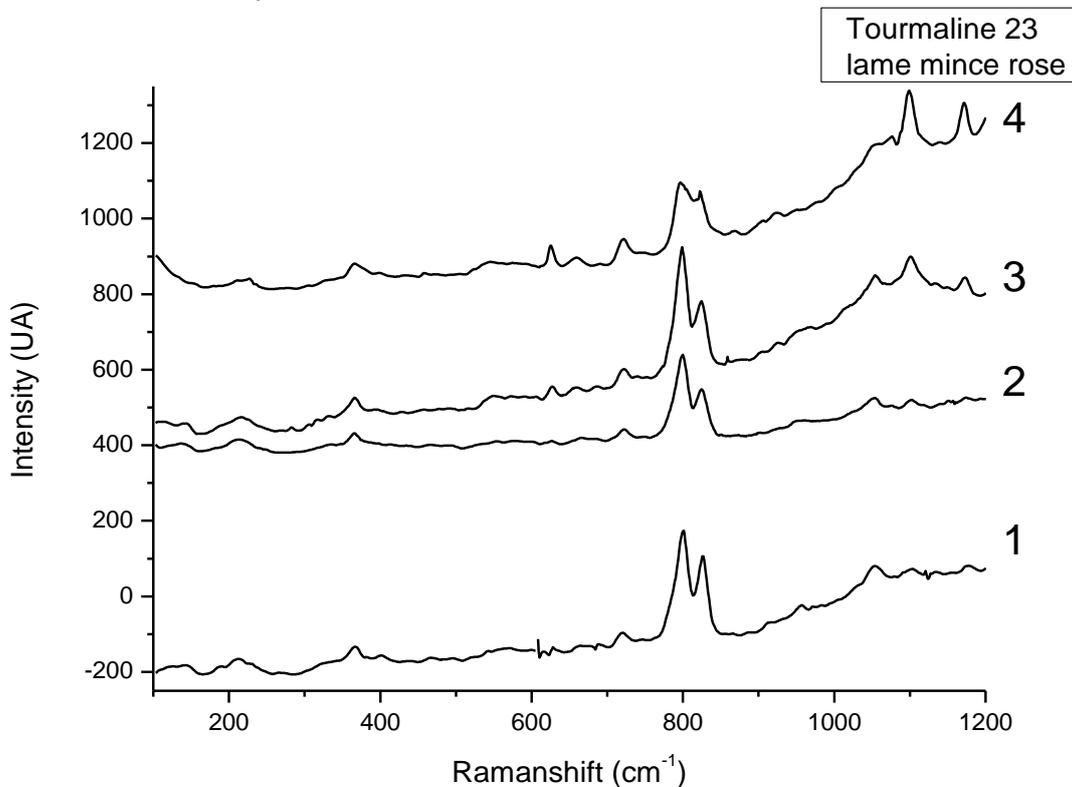


Figure 48 : Zoom sur la partie structurale des spectres Raman compilés de la lame mince 2 (voir les points de mesure sur la photo 3) de 100 à 1200 cm^{-1} . On retrouve les pics standards 222, 375, 409, 710-750, 1050-1090 cm^{-1} .

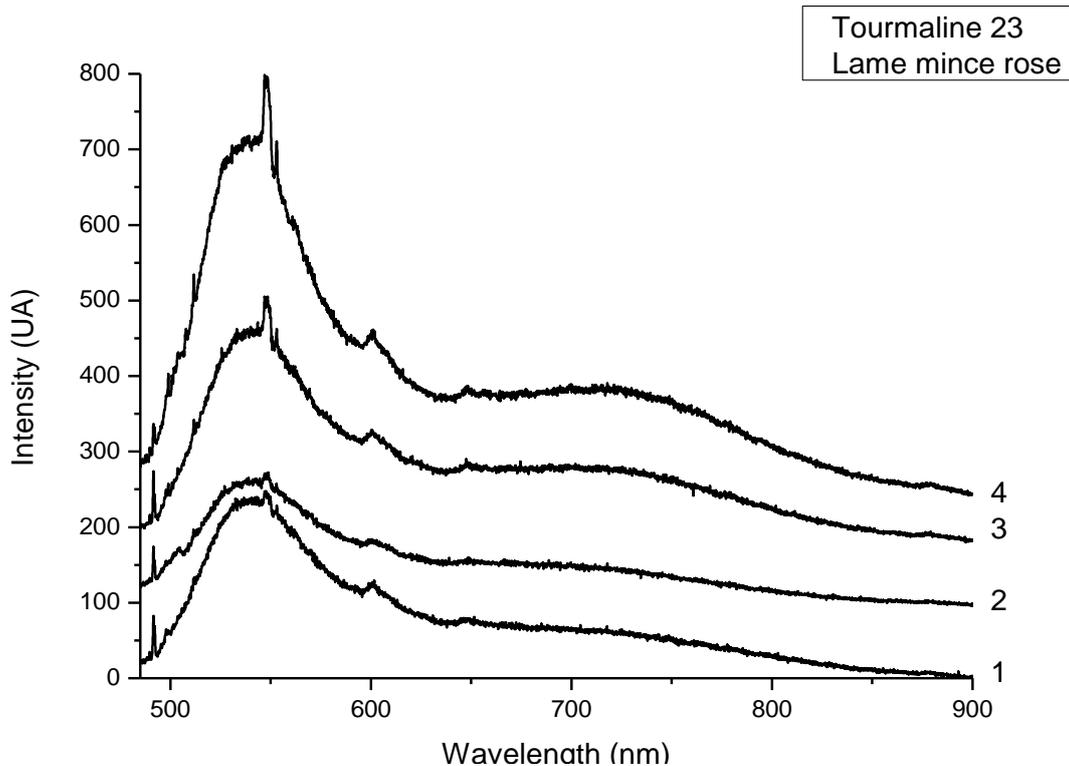


Figure 49 : Spectres de luminescence de la lame mince 2 (voir les points sur la photo 3) de 480 à 900 nm. On retrouve une bande large commençant à 500 nm qui semble correspondre au Mn, On voit aussi la présence de Fer.

ANALYSE GEOCHIMIQUE PAR TECHNIQUES DE LABORATOIRE

J'ai eu la chance de pouvoir dans le cadre d'un second stage avec Mr Martelat d'aller à l'Université Blaise Pascal de Clermont Ferrand, au Laboratoire Magma et Volcan (LMV), faire des analyses avec une Microsonde électronique et un MEB. Ces analyses précises ne sont pas destructives, mais induisent des préparations particulières (lame mince ou surfaces polies).

MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (MEB)

Le Microscope Electronique à balayage est un outil d'observation à très fort **grossissement** de la matière ou de petits objets. Ces observations ne sont pas directes contrairement aux instruments optiques, mais indirects, donc électronique par l'usage d'un capteur CCD, et d'un écran. Pour obtenir cette image, on **utilise plusieurs propriétés de la matière** lorsque celle-ci rentre en contact avec des électrons. C'est donc une **interaction matière/électron**. De plus cet appareil peut nous donner **une idée de la composition chimique** du matériau par point (pixel), par coupe (ligne) ou par carte (carte de composition en un élément en particulier,...). Ces données sont indicatrices, mais bien moins précises que celles que l'on peut obtenir à la microsonde électronique.

MICROSONDE ELECTRONIQUE

La microsonde électronique procède comme le MEB, elle utilise **les propriétés des interactions matière/électrons**, pour nous renseigner de façon très précise sur la

composition d'un matériau. Les électrons émis rentrent en contact avec l'objet étudié, et chaque élément constituant va émettre un rayonnement X particulier. Ces rayons X sont alors mesurés par des détecteurs qui sont calibrés avec des standards. Les problèmes sont les limites de ces détections. En effet, on ne peut obtenir que la concentration des éléments majeurs de l'échantillon, les éléments mineurs pouvant être cachés par d'autres, ou par le bruit lié à la mesure (faux pics),...

RESULTATS

LAME MINCE 1

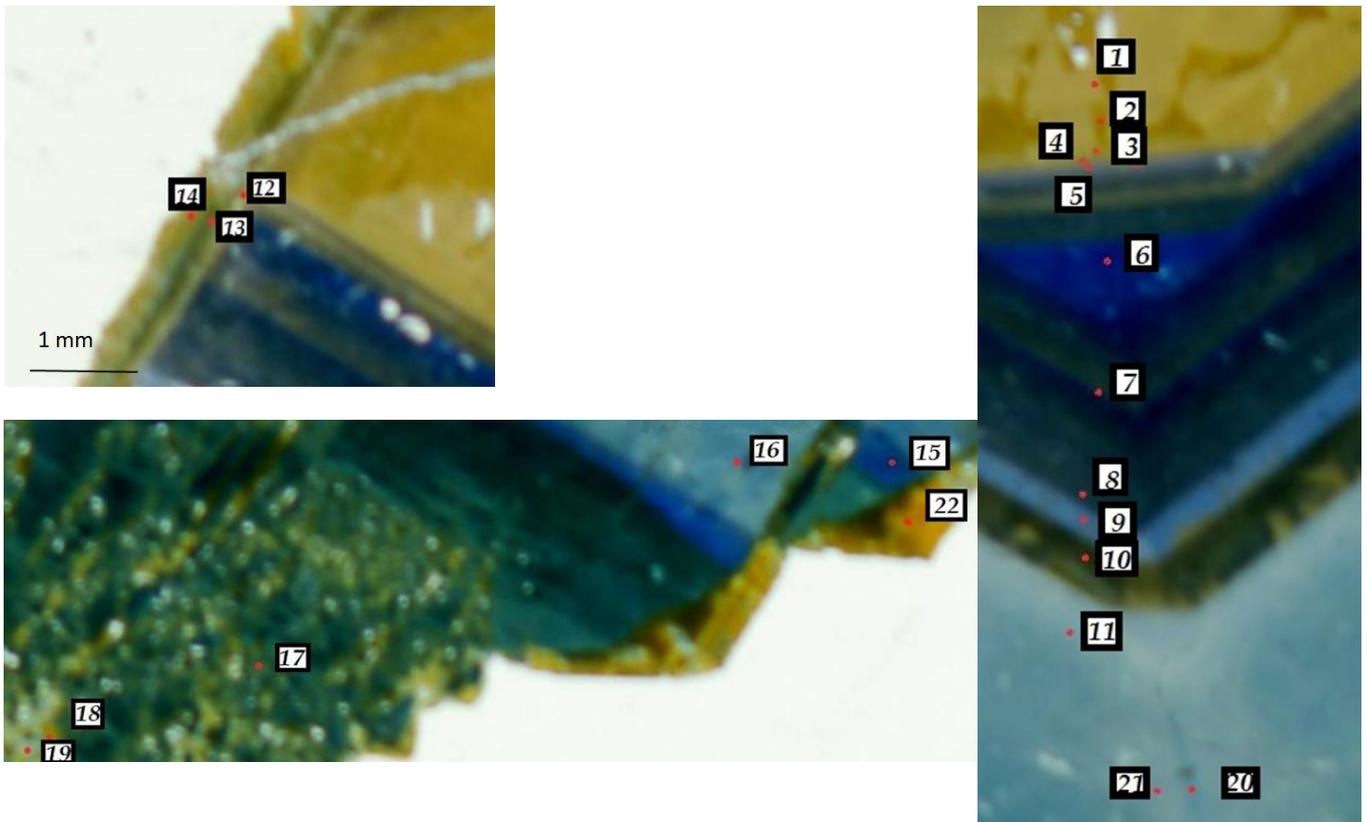


Photo 4 : Photos montrant précisément les emplacements des points de mesure effectués sur la lame mince 1 de tourmaline à la microsonde électronique.

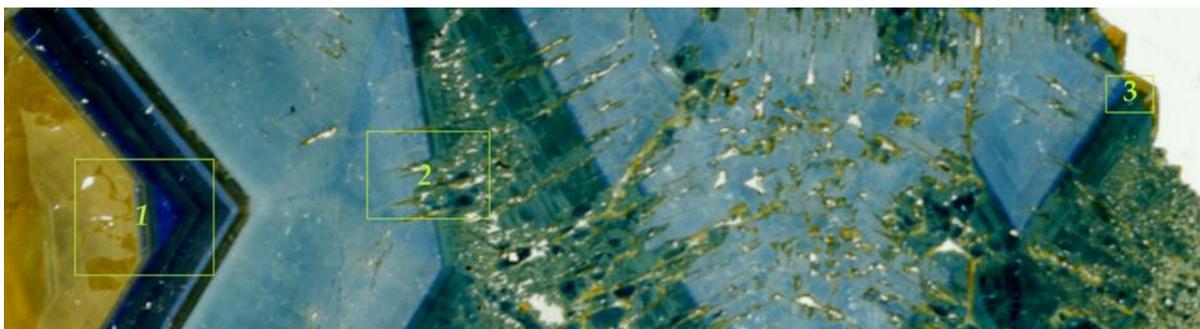


Photo 5 : Image montrant sur la lame mince 1 de tourmaline les zones analysées au MEB

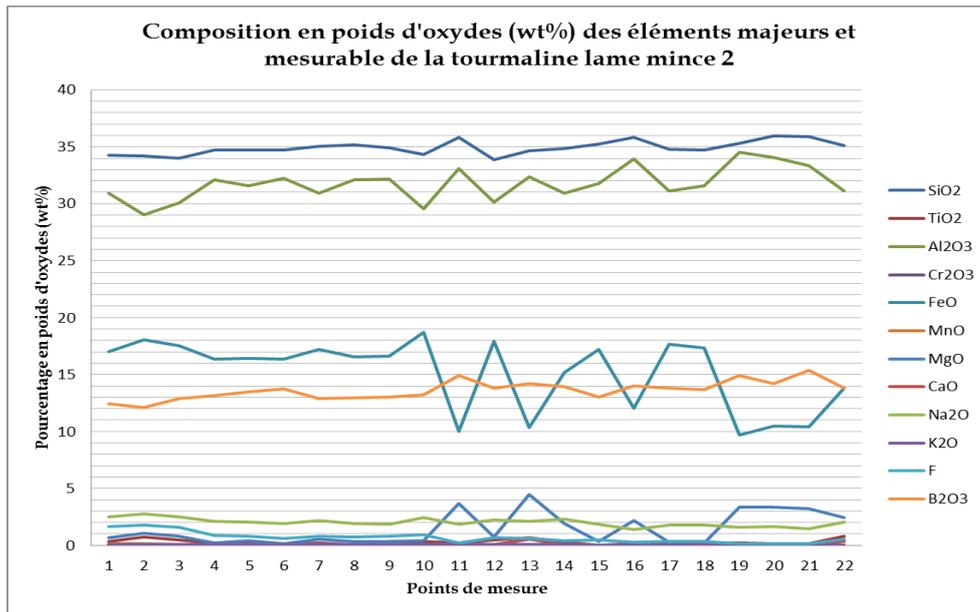


Figure 50 Graphique montrant la composition en poids d'oxydes (wt%) des éléments majeurs mesurable de la tourmaline par microsonde électronique sur la lame mince 1. Le Bore est mis par défaut, il cache ainsi la présence d'une quantité non négligeable d'eau. L'analyse est finalisée à 100% avec le B. On pose l'hypothèse que l'H₂O est négligeable (pas dans certains cas). l'H₂O est sous-estimé et le B sur estimé.

On remarque qu'il y a des variations chimiques notables entre différents domaines (par exemple: variation de la teneur en Fer de 17 wt% à 10 wt%). Les éléments les plus variant étant Al, Fe, F, Mn. Ils sont responsable des zones de couleurs visibles à l'œil nu et/ou au MEB.

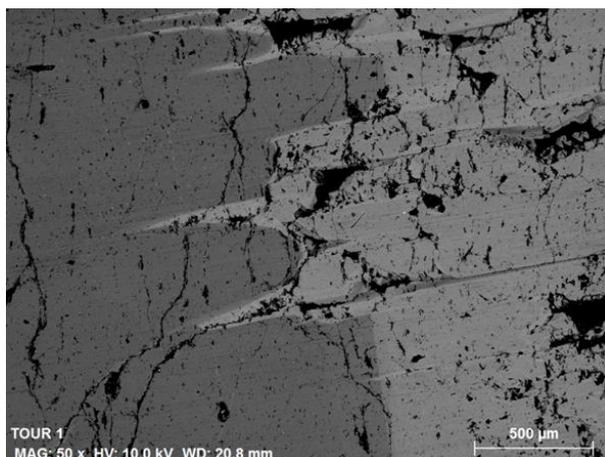
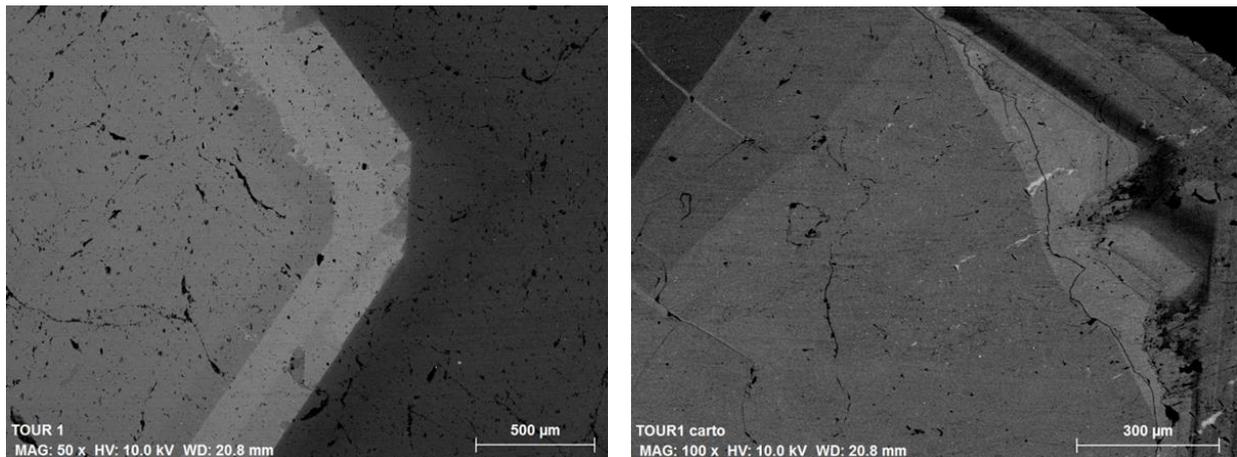


Figure 51 : Photo légendées montrant les zones photographiées au MEB, au milieu, à gauche, photo de la zone 1, à droite photo de la zone 3, et en bas à gauche photo de la zone 2. Les contrastes de gris visibles sont caractéristiques des variations chimiques, celle-ci même qui soulignent des limites cristallines telles que les macles, zones de déformations,... mais aussi différenciations chimiques, inclusions,... Et les déformations intra cristallines.

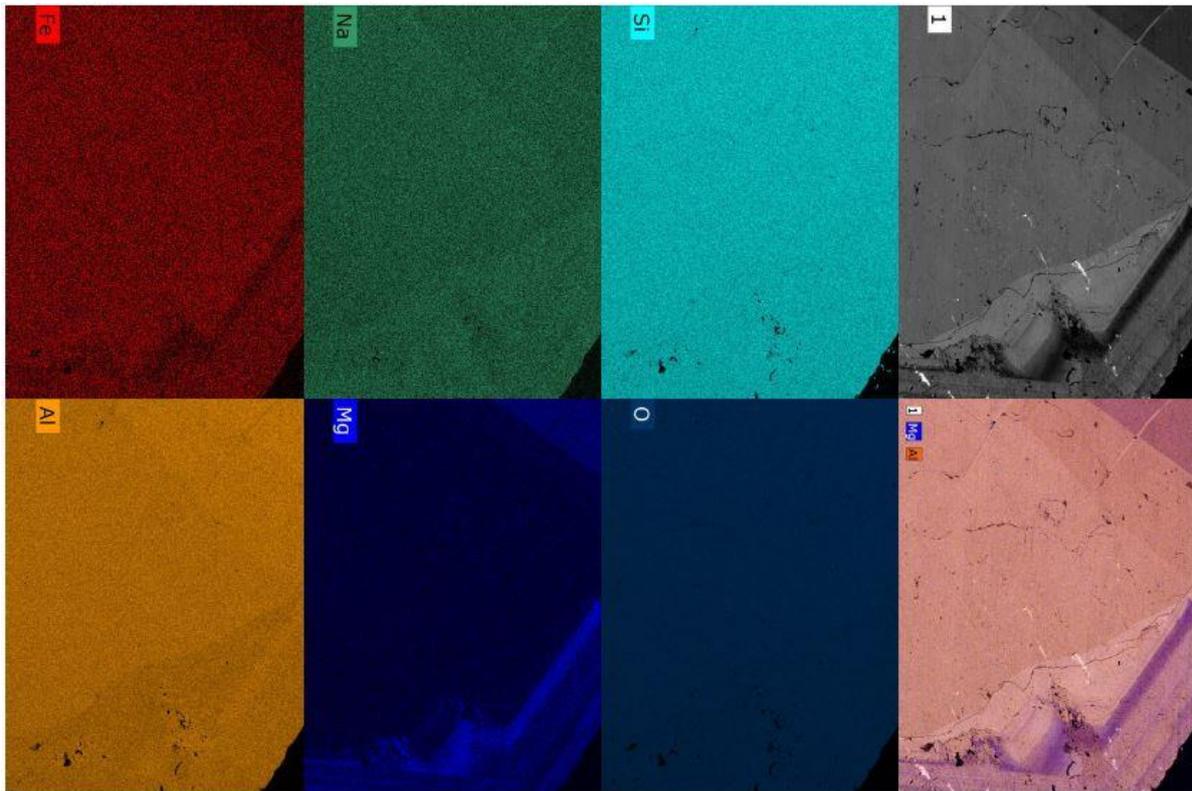


Figure 52 : Cartographie suivant les éléments majeurs mesurable avec le MEB. La zone cartographiée correspond à la zone 3 de la lame mince 1. On peut noter que Si est homogène, comme O. Le Na ne varie pas énormément mais souligne des géométries que Mg, Al et Fe souligne beaucoup. On remarque aussi que lorsque Mg est faible, le Fe est important, et vice versa. Na souligne des petites structures plus discrètes (clivage ? macles ?...).

LAME MINCE 2

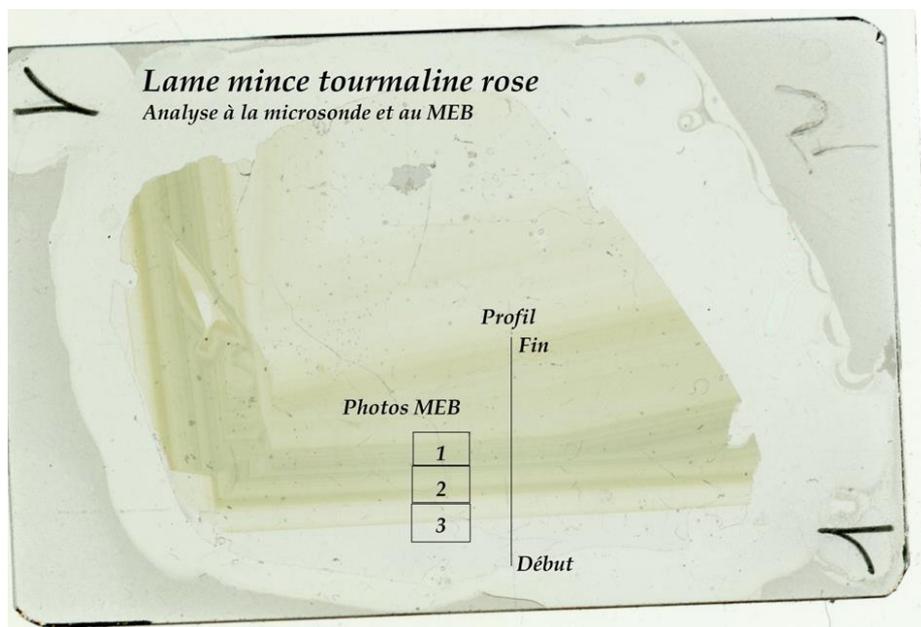


Photo 6 : Scan de la lame mince 2 présentant les zones imagées au MEB, et le profil analysé à la microsonde électronique

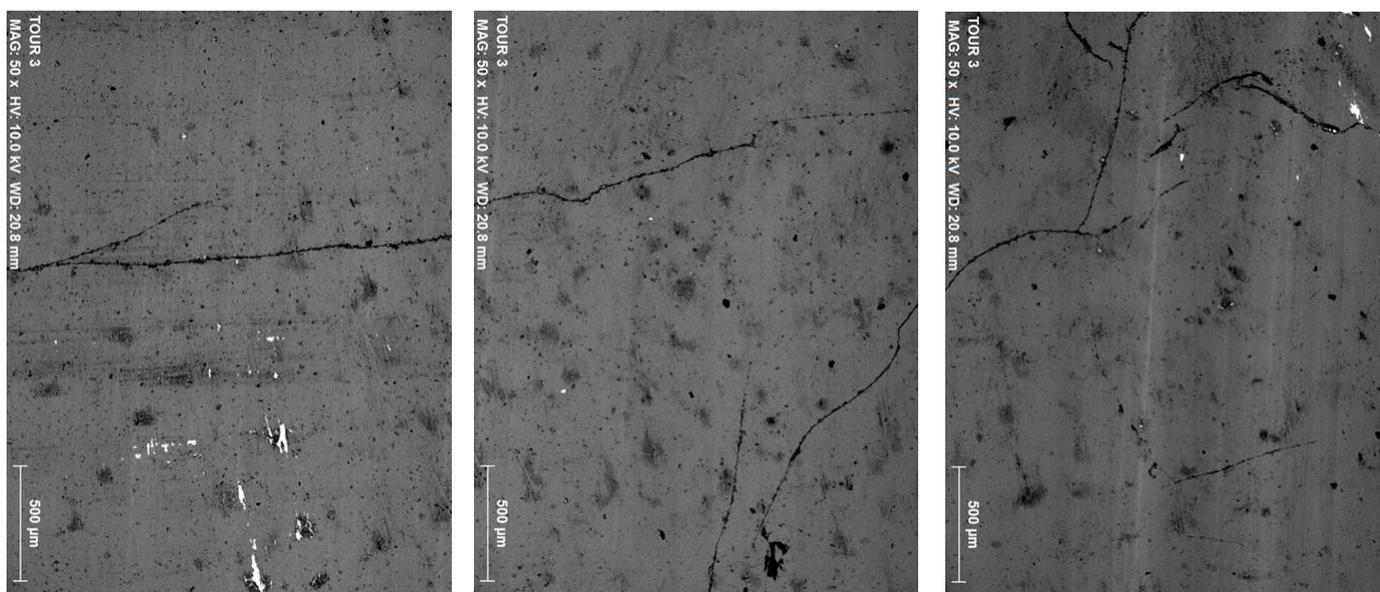


Figure 53 : Ensemble de 3 photos réalisées au MEB sur la lame mince 2 de tourmaline. De 1 à 3 en partant de la droite vers la gauche (photo 6). A noter que malgré une variation otique lamellaire visible (zonation de croissance), ces images sont très homogènes. La variation de couleur observé sur cette tourmaline n'est donc pas due à une variation chimique

Résultats diffusion Raman et de luminescence (figure 42 à 49) : Pour pouvoir analyser correctement ces différents spectres, j'ai réalisé en plus **ceux de la résine, afin de pouvoir éventuellement enlever ses pics caractéristiques** (figure 45). On peut ainsi remarquer que **l'on ne voit pas de différence forte entre les différents spectres**. En effet on n'observe que de **simples fluctuations d'intensité**, que ce soit pour la lame mince 1 ou 2. L'analyse à la micro spectrométrie Raman permet donc **d'avoir une seule signature par individu, même si on a des zonations**.

Résultats du MEB (figure 51, 52 et photo 5, figure 53 et photo 6) : On peut voir avec cet outil que **la chimie de ces mono- cristaux peut varier de l'intérieur vers l'extérieur de façon fine**. Très visible sur la lame mince 1 (figure 51, 52) et très peu visible sur la lame mince 2 (figure 52). On peut remarquer sur la lame mince 1 des **variations de compositions qui suivent à peu près les différences de couleurs visibles en lumière naturelle**. Avec les cartographies par éléments, on peut **observer que les éléments qui varient et qui changent de concentration suivant les zones sont : Al, Fe, Na et Mg**. Cependant on peut aussi voir que ce sont surtout **Mg et Al qui sont responsables des variations visibles** sur les images MEB, et à l'œil nu.

Résultats de la microsonde électronique (photo 4 et tableau 9, photo 6 figure 50) : On voit que **la chimie varie de façon répétitive sur la lame mince 1**, et que **les petites tourmalines secondaires qui nucléées, autour du phénocrystal sont de compositions identiques, mais différentes de celle du phénocrystal** (figure 50). De même que la **composition interne de ce phénocrystal varie de façon précise suivant les zonations**. Il faut donc prendre en compte cela pour interpréter les spectres dans le but d'une détermination. **La lame mince 2 ne comporte pas de changement flagrant de composition et paraît assez homogène**, avec des variations continues entre l'intérieur et l'extérieur du cristal. Les images MEB donnent donc **une meilleure idée de la composition qui est dans l'ensemble homogène**. Les

variations de couleurs visibles a l'œil nu ont donc une origine soit très fines de composition, soit de valence des éléments, soit du a des éléments traces.

Enfinement la lame mince1 présente en réalité 2 générations différentes. On a deux cristaux co-génétiques qui sont séparés par des petits cristaux plus récents issus de processus de nucléation. Ceux-ci utilisant, semble-t-il des éléments issus de l'altération des premiers cristaux, ou bien que les premiers cristaux se soient mis en place dans un environnement, et que les conditions de cristallisations ont changées. La stabilité a ainsi mis à profit une importante nucléation de plusieurs petites tourmalines plus récentes. Mais ce en utilisant les restes du liquide de départ. La lame mince 2 semble avoir cristallisé dans un environnement plus stable, et est ainsi très homogène chimiquement parlant, la couleur pouvant être due à d'autres mécanismes qu'il serait intéressant de déterminer. On est ainsi en présence de ce qui semble être deux conditions différentes de genèse de tourmaline. Il pourrait être intéressant de réaliser les mêmes études sur d'autres afin de comparer les résultats.

V INTERPRETATIONS ET DISCUSSION

Bien que toutes les tourmalines présentées dans ce travail sont bien des tourmalines (données Raman), il reste des éléments importants à préciser. Les analyses réalisées avec les outils classiques de gemmologie, à savoir la densité, les indices de réfractons, la biréfringence, et la détermination des inclusions ne nous ont pas permis d'identifier toutes ces tourmalines de façon sûre. En effet, les tourmalines (densité 1, 7, 8, 16 (tableau 6), réfractométrie 4, 12, 13 14, 15, 18 (tableau 7)) n'auraient pas été identifiées facilement comme-t-elles avec une seule analyse. De même que ces méthodes ne donnent pas d'indications suffisamment explicites pour pouvoir connaître l'espèce ou la série. Peut-être que c'est impossible avec ces outils. Pour des analyses plus précises, réalisables uniquement dans des laboratoires, ou avec un matériel plus coûteux, comme l'effet Raman, la luminescence et l'absorbance, on obtient des résultats plus discriminants. On peut voir que toutes les tourmalines ressortent avec des points communs significatifs, avec le micro spectromètre Raman (figure 19). Il est donc possible de déterminer la famille avec le Raman (figure 27-39). De plus il semble que l'on ait en plus de ces raies caractéristiques, des raies plus typiques des séries continues de la tourmaline. On pourrait ainsi avoir des précisions sur les espèces possibles, et en déterminer certaines (dans une gamme de 200 à 1200cm⁻¹, raie souvent visible à 377,224, 510 et 750cm⁻¹). La luminescence nous montre des éléments typiques des tourmalines qui peuvent être la signature d'une série (fer, manganèse, chrome), ou la présence d'éléments traces (Sm, Nd). L'absorbance quant à elle, n'a pas donné de résultats très précis sauf un pic toujours présent à 808nm (figure 40 et 41), mais des pics caractéristiques d'éléments particuliers, que l'on retrouve sur certains échantillons. Enfin les analyses non destructrices de cristallographie ont montrées que l'on pouvait avoir des différences de chimie non négligeable au sein d'un même cristal (jusqu'à 10wt%). C'est variations sont très intéressantes pour caractériser les conditions de cristallisation. C'est un travail à apprécier dans une optique de compréhension géologiques. Cela appuie ainsi le fait que l'on puisse avoir des résultats typiques de deux espèces différentes, alors que l'on n'analyse qu'un seul. On peut donc avoir deux espèce différente de tourmaline pour un même cristal si les conditions changent ou des paramètres caractéristique. Reste la question de savoir si deux espèces peuvent être visible dans une espèce....Il est alors important de combiner plusieurs caractère pour déterminer une seule espèce.

Les analyses que j'ai réalisées n'ont été faites que sur **un nombre très restreint de tourmalines, de même que leurs provenances, ainsi que leurs diversités spécifiques n'ont pas été aussi grandes que je ne l'espérais**, mais cela montre qu'il faut **compléter ces mesures, et continuer de chercher dans cette voie. Les mesures réalisées dans toutes les orientations possibles d'un cristal, montrent bien que certains pics peuvent bouger, voir disparaître suivant l'orientation** (chrome, partie hydraté), et qu'une **simple mesure suivant une seule orientation pouvait donner des résultats incohérents** (apparition et disparition et migrations de pics). Enfin il est aussi **possible que les variations de structures et de caractéristiques optiques et physiques ne soient pas assez importantes pour être visible avec les appareils actuels, ou encore soient indétectables**. Cependant, j'ai mis en avant dans ce travail **l'importance de l'orientation des cristaux**, ce qui est nécessaire pour l'étude des tourmalines, mais aussi des autres cristaux. Ce qui pose **la question de la détermination des lames minces pétrologique, qui ne donne qu'un accès plan au cristal**. Il faudrait donc pour moi revoir nos critères de déterminations Raman et créer des modèles 3D Raman des cristaux pour avoir le panel complet des spectres que l'on peut observer sur une coupe. Et ce pour pouvoir déterminer de façon sûre un minéral par utilisation Raman. Il est donc tout à fait possible que l'on ne puisse pas avec des méthodes non destructrices, connaître de façon sûre l'espèce de tourmaline que l'on analyse, et ce d'autant plus que les séries continues se recoupent sans avoir fait avant des mesures de références basées sur des compositions chimiques précises. Mais ceci n'est vrai que pour l'utilisation d'un seul type de mesure. Si on combine de nombreux types de mesures différentes et complémentaires comme j'ai commencé à le faire, il est certain qu'il est possible de trouver précisément la position et le nom précis d'une tourmaline. Aussi il est important de poser la question de savoir qu'est ce qui est déterminant pour classer les tourmalines, si c'est la structure atomique ou les éléments, ou les deux ? Ainsi, je compte continuer à collecter d'autres échantillons d'espèces et d'origines différentes afin de pouvoir, par la suite continuer ce travail, et obtenir des résultats significatifs sur l'éventuelle possibilité que l'on puisse déterminer avec des instruments non destructifs les espèces de tourmalines. Je continuerais aussi à m'informer des avancées des autres chercheurs sur ce sujet.

VI CONCLUSION GENERALE

En conclusion général sur ce travail, je dirais que pour moi **il est possible d'identifier de façon précise la série d'une tourmaline grâce à la spectrométrie Raman, et même de définir vers quel pôle pure l'échantillon se trouve**. Mais pour cela il m'aurait fallu beaucoup plus de matériel et de temps. Il serait alors possible de réaliser des mesures et des spectres de référence de tourmalines se trouvant à plusieurs endroits sur une série continue, et aussi analyser par diffraction X leur composition pour les fixer de façon certaine. Aussi je pense qu'au vue des nouveaux gisements et des nouvelles espèces et variétés que l'on a découvertes récemment, **il faudrait redéfinir les standards de valeurs de références pour les analyses classiques**. Enfin j'ai trouvé ce travail vraiment très enrichissant. Je suis désormais encore plus passionné que jamais sur le monde des pierres gemmes, et je compte bien continuer dans ma lancée et poursuivre mes recherches sur la tourmaline, mais pas que...

Je vous remercie d'avoir pris la peine de lire mon travail, et je remercie aussi ma petite amie et ma famille pour leurs aides et soutient, Mr Martelat pour son aide et ses conseils toujours très utiles, les personnes des laboratoires pour leurs patiences et leurs explications et enfin Mr Panczer pour son aide bien évidemment, mais aussi pour m'avoir permis de participer à son DUGEM.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]Aepinus. (1756) – Lettre de Benjamin Franklin à William Heberden du 7 juin 1756
- [2]Deer, Howie and Zussman. (1965)*Rock forming mineral* page 300-319
- [3]Dietrich (1985) cours de Mr Panczer
- [4]Franck C. Hawthorne and Dona M. Dirlam (2011) - Tourmaline the indicator mineral from atomic arrangement to Viking navigation, *Element*
- [5]Franck c. Hawthorne and Darrel J. Henry (1999) – Classification of the minerals of tourmaline group, *European journal of mineralogy*
- [6]Federico Pezzotta and Brendan M. Laurs (2011) – Tourmaline: The kaleidoscopic gemstone, *Element*
- [7] Thierry Douillard (2003) – Les tourmalines du mont Ibity (Madagascar), Mémoire du diplôme de gemmologie de Nantes.
- [8] Kristen m. Longfellow and Samuel E. Swanson (2011) - Skeletal tourmaline undercooling, and crystallization history of the Stone Mountain granite, Georgia U.S.A. , *The Canadian Mineralogist*.
- [9]Vincent J.van Hinsberg (2011) – Tourmaline: an ideal indicator of its host environment, *The Canadian mineralogist*
- [10]Vincent J.van Hinsberg (2011) – Tourmaline as a petrologic forensic mineral: A unique recorder of its geologic past
- [11]Alexander Shtunkenberg et al (2007) – Symmetry and crystal structure of biaxial elbaïte-liddicoatite tourmaline from the transbaikalia region, Russia
- [12] Paul B. Merkel and Christopher M. Breeding (2009) – Spectral differentiation between copper and iron colorants in gem tourmalines, *Gems & Gemology*
- [13]Michael Gaft, Renata Reisfeld and Gérard Panczer (2005) - *Modern Luminescence Spectroscopy of Minerals and Materials*, edition Springer
- [14] Paul B. Merkel and Christopher M. Breeding (2009) - Spectral differentiation between copper and iron colorants in gem tourmalines