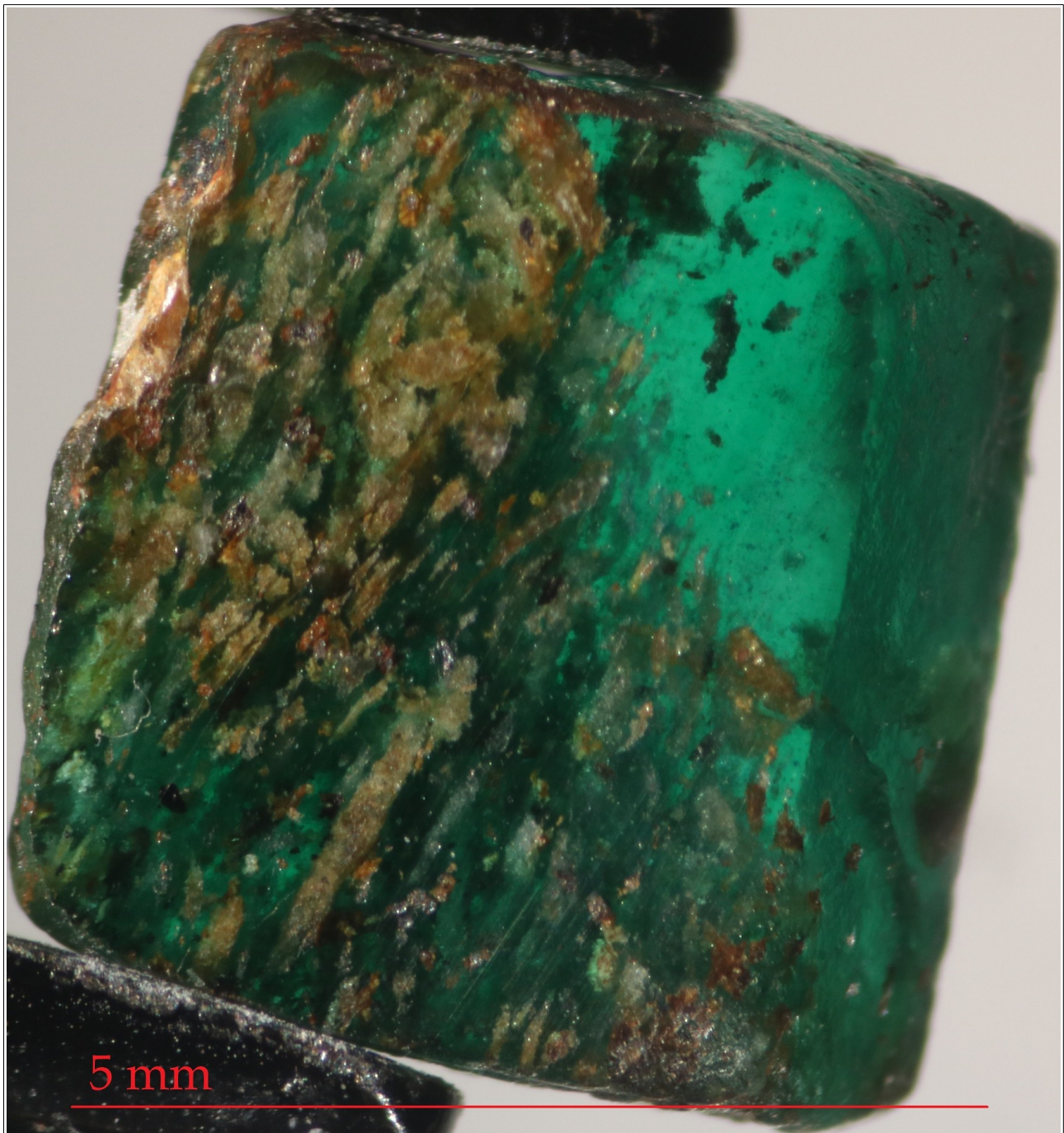


Étude des inclusions solides des émeraudes indiennes  
de l'État de Jharkhand : apports à la compréhension de  
la chimie et de la genèse du gisement



Photographie de l'échantillon VM01 en lumière naturelle. L'émeraude montre un paysage d'inclusions variées et abondantes.

# Table des matières

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| 1.Introduction.....                                                   | 3  |
| 2.État des connaissances.....                                         | 4  |
| 2.1.Généralités sur le béryl et la variété émeraude.....              | 4  |
| 2.2.Gîtologie de l'émeraude.....                                      | 5  |
| 3.Matériaux et méthodes.....                                          | 6  |
| 3.1.Échantillons utilisés et préparation.....                         | 6  |
| 3.2.Gemmologie classique.....                                         | 6  |
| 3.3.Micro-spectroscopie Raman.....                                    | 7  |
| 3.4.Microscope électronique à balayage (MEB).....                     | 7  |
| 3.5.Analyses complémentaires par spectroscopie infrarouge (IR).....   | 7  |
| 4.Résultats.....                                                      | 8  |
| 4.1.Gemmologie classique.....                                         | 8  |
| 4.2.Spectroscopie Raman, IR et chimie de l'émeraude.....              | 8  |
| 4.3.Identification des inclusions solides.....                        | 11 |
| 4.3.1.Quartz.....                                                     | 11 |
| 4.3.2.Rutile.....                                                     | 12 |
| 4.3.3.Zircon.....                                                     | 13 |
| 4.3.4.Titanite.....                                                   | 14 |
| 4.3.5.Fluorapatite.....                                               | 15 |
| 4.3.6.Talc.....                                                       | 16 |
| 4.3.7.Aluminosilicate de fer, de calcium et de cérium.....            | 17 |
| 4.3.8.Aluminosilicate de magnésium et de fer.....                     | 18 |
| 4.3.9.Oxyde de fer.....                                               | 18 |
| 4.3.10.Minéral de pic caractéristique à 1084 cm <sup>-1</sup> .....   | 19 |
| 4.3.11.Silicate d'yttrium, de calcium, de fer et de terres rares..... | 20 |
| 4.3.12.Phosphate-carbonate de cérium et de lanthane.....              | 21 |
| 5.Discussion.....                                                     | 23 |
| 5.1.Détermination des inclusions à identification complexe.....       | 23 |
| 5.1.1.Allanite-(Ce).....                                              | 23 |
| 5.1.2.Clinocllore.....                                                | 24 |
| 5.1.3.Hématite.....                                                   | 25 |
| 5.1.4.Calcite.....                                                    | 25 |
| 5.1.5.Hinnganite-(Y).....                                             | 26 |
| 5.1.6.Indéterminé.....                                                | 27 |
| 5.2.Inclusions et contexte gîtologique.....                           | 27 |
| 5.3.Spécificités du gisement de Jharkhand.....                        | 28 |
| 6.Conclusion.....                                                     | 30 |
| 7.Bibliographie.....                                                  | 31 |
| 8.Annexe : fiches de travail.....                                     | 32 |
| 8.1.VM01.....                                                         | 32 |
| 8.2.VM02.....                                                         | 46 |
| 8.3.VM03.....                                                         | 54 |
| 8.4.VM04.....                                                         | 56 |
| 8.5.VM05.....                                                         | 59 |
| 8.6.VM06.....                                                         | 62 |
| 8.7.VM07.....                                                         | 65 |

## 1. Introduction

L'émeraude est une variété verte du béryl, un cyclosilicate structurellement riche en béryllium. Elle doit sa coloration à la présence de chrome ou de vanadium, présents en impuretés. Ces éléments se trouvent dans des réservoirs géologiques différents de ceux du béryllium. Cela implique que la cristallisation d'émeraude se réalise à la jonction de roches représentatives de ces réservoirs, en présence de fluides afin de permettre les échanges chimiques. L'émeraude est donc un minéral de roches réactionnelles.

Ce statut lui permet souvent d'héberger des paragenèses d'inclusions solides très diversifiées, souvent accompagnées d'inclusions fluides. Cependant, la variabilité entre les gisements fait que ces inclusions peuvent différer de l'un à l'autre. Ainsi, on a souvent utilisé la description des inclusions de l'émeraude afin d'aider à la caractérisation des gisements. Cette caractérisation permet ensuite, en première approche, d'aider à l'identification de l'origine géologique voire géographique des pièces du marché, bien qu'elle ne suffise pas à affirmer un résultat.

Le gisement de l'État de Jharkhand, en Inde, découvert en 2012, est devenu assez productif et populaire sur le marché local, bien que son exploitation soit aujourd'hui encore illégale. Situé au niveau des collines de Ghorabandha dans le district de Purbi Singhbhum, il correspondrait à un gisement secondaire par dépôt d'alluvions, avec un gisement primaire proche bien que mal identifié. La localité appartient à un grand ensemble métamorphique, la zone de cisaillement de Singhbhum (Choudary, 2015).

Aujourd'hui encore peu étudié, ce gisement montre cependant un potentiel minéralogique fort. Les études préliminaires de Choudary (2015) indiquent une paragenèse aujourd'hui unique parmi les gisements d'émeraudes : actinolite, allanite-La, apatite, beta-fergusonite, épidote, spinelles ferrières (chromite/magnétite/picotite), micas (annite/phlogopite/chamosite/biotite), phenakite, quartz, rutile, titanite et zircon, avec une absence notable d'inclusions fluides. Le but de cette étude est donc d'aider à la caractérisation des inclusions solides du gisement. Cela permettra d'aider à comprendre un contexte de genèse unique, à l'origine de la diversité minéralogique inhabituelle observée, ainsi qu'à mieux caractériser le gisement.

Pour cela, on utilisera un set d'échantillons bruts issus de la production locale, fournis par GGTL Laboratories. Les inclusions solides seront analysées au micro-Raman (caractérisation des matériaux) ; ainsi qu'au microscope électronique à balayage (MEB) via des micro-analyses par dispersion d'énergie (EDS) (caractérisation de la chimie). Ce croisement de méthodes permettra leur identification. Ces méthodes permettront également l'analyse de l'émeraude, afin de mieux isoler le signal des nombreuses micro-inclusions (Choudary, 2015), souvent influencé par leur environnement proche. Enfin, des analyses infrarouge (IR) seront effectuées afin de caractériser les fluides présents dans les canaux du béryl.

## 2. État des connaissances

### 2.1. Généralités sur le béryl et la variété émeraude

Le béryl est un cyclosilicate de formule  $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$  avec un système cristallin hexagonal, de dureté 7,5 à 8 sur l'échelle de Mohs, et d'habitus classique en prisme hexagonal (Cassedane *et al.*, 1997) (Figure 1). Il présente des anneaux de 6 tétraèdres de silice, empilés selon l'axe cristallographique c. Ces anneaux piègent souvent des molécules d'eau  $\text{H}_2\text{O}$ , ainsi que des ions alcalins (Cassedane *et al.*, 1997). L'eau peut prendre deux formes dans les canaux : le type I présente un vecteur H-H parallèle à l'axe c, et le type II présente un vecteur H-H perpendiculaire à l'axe c et s'associe à un ion alcalin (Della Ventura *et al.*, 2015). Du  $\text{CO}_2$  peut également être piégé dans les canaux.

L'aluminum peut être remplacé dans la structure par du  $\text{Cr}^{3+}$  ou du  $\text{V}^{3+}$  en impuretés (Cassedane *et al.*, 1997). Le béryl prend alors une couleur verte, donnant ainsi la variété émeraude (Groat *et al.*, 2008) (Figure 1). Celle-ci n'est pas à confondre avec le béryl vert, une autre variété plus pâle colorée par une présence conjointe de fer ferrique et de fer ferreux, dont le statut fait débat (Groat *et al.*, 2008).

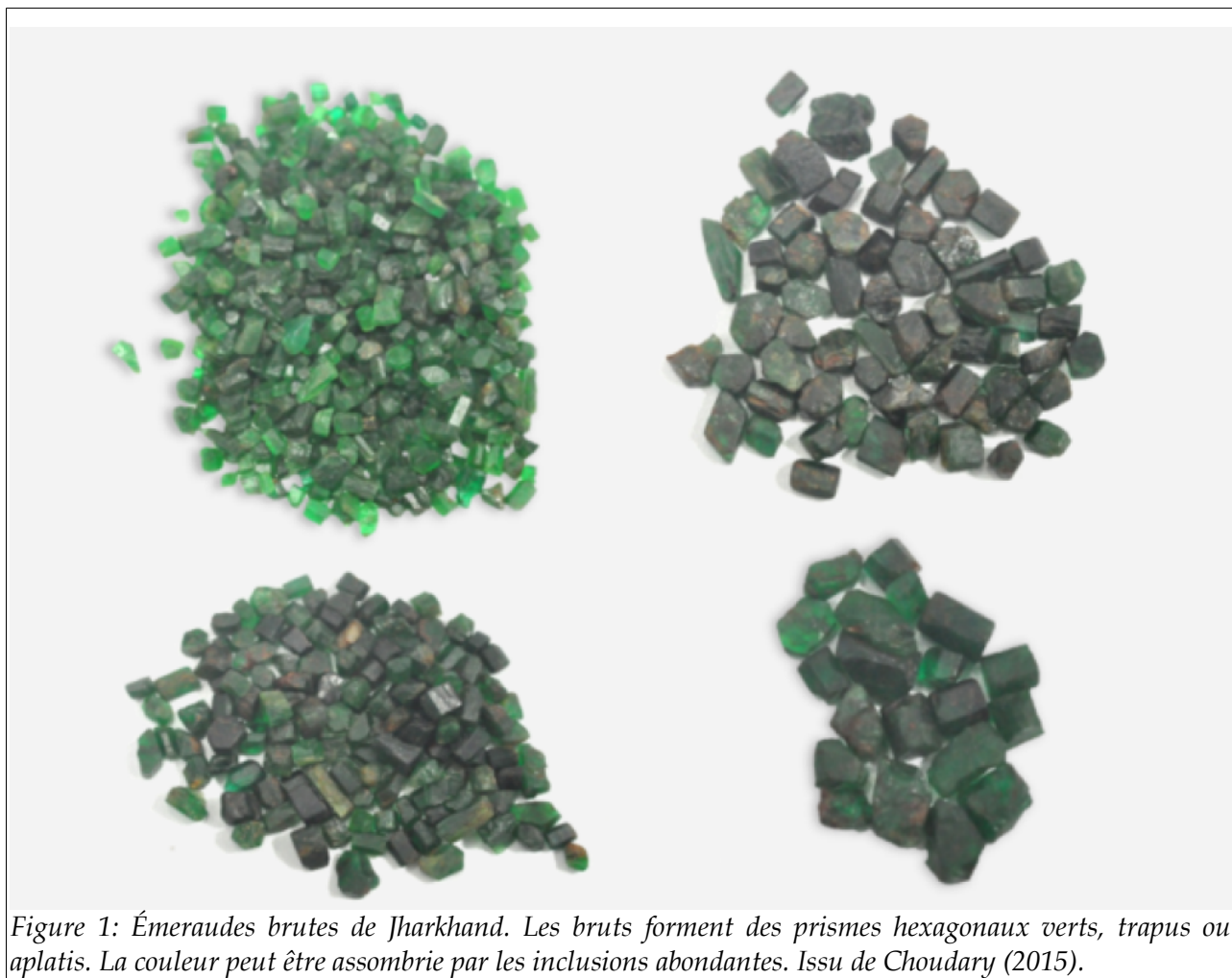


Figure 1: Émeraudes brutes de Jharkhand. Les bruts forment des prismes hexagonaux verts, trapus ou aplatis. La couleur peut être assombrie par les inclusions abondantes. Issu de Choudary (2015).



Les informations suivantes sont tirées de la base de données de gemdat.org. En gemmologie classique, l'émeraude se caractérise par une densité allant de 2,67 à 2,78 et un indice de réfraction variant de 1,565 à 1,602. Elle présente une biréfringence variant de 0,004 à 0,010, un signe optique uniaxe négatif, et un dichroïsme fort allant de vert-jaune à vert-bleu. Elle est souvent inerte à la lampe ultraviolet. Elle est souvent riche en inclusions solides et en inclusions fluides.

## 2.2. Gîtologie de l'émeraude

La croissance de l'émeraude nécessite la présence conjointe de béryllium, indispensable pour la structure du béryl, ainsi que de chrome ou de vanadium, responsables de la couleur de l'émeraude. Ces éléments se trouvent dans des réservoirs géologiques distincts.

Le béryllium est un élément peu présent dans la croûte continentale supérieure. On le trouve dans des roches qui le concentrent, classiquement dans des pegmatites (Groat *et al.*, 2008). Il s'agit de roches issues d'un magmatisme acide. Le magma, lors de sa progression en filons, se concentre en élément volatils, en éléments incompatibles et en éléments dits pegmatophiles tels que le béryllium (Cassedane *et al.*, 1997). Le béryllium peut également se trouver dans les black shales, des roches sédimentaires riches en matière organique (Groat *et al.*, 2008).

Le chrome est un élément souvent concentré dans les roches basiques à ultrabasiques de la croûte océanique et du manteau. On en trouve classiquement dans les serpentinites et les péridotites. Du chrome et du vanadium peuvent également être trouvés dans les black shales (Groat *et al.*, 2008).

L'émeraude est donc cristallisée à la jonction entre les roches de magmatisme acides concentrés en béryllium et les roches ultrabasiques concentrées en chrome, et cristallise via une circulation de fluides responsables des échanges chimiques entre les deux réservoirs. Elle peut également se trouver dans les black shales si ceux-ci sont tectonisés.

On reconnaît alors deux grands types de gisement : les gisements associés à des intrusions pegmatitiques dans des roches ultrabasiques, et les gisements contrôlés par la tectonique et le métamorphisme, qui comprennent les schistes sans pegmatites et les black shales (Groat *et al.*, 2008). Cependant, cette classification n'est pas toujours évidente et il peut être compliqué d'évaluer la genèse d'un gisement.

### 3. Matériaux et méthodes

#### 3.1. Échantillons utilisés et préparation

Les échantillons utilisés, fournis par GGTL Laboratories, correspondent à un set de 7 émeraudes vert foncé, brutes, très incluses, avec parfois des zonations dans l'abondance d'inclusions, d'habitus prismatique hexagonal, présentant des faces rugueuses et des arêtes effacées. Les échantillons sont numérotés de VM01 à VM07 (Figure 2).

L'échantillon VM01 a été reçu poli selon deux faces prismatiques parallèles. L'échantillon VM02 a été reçu poli selon une coupe perpendiculaire aux faces prismatiques. Les échantillons VM04, VM05 et VM06 ont été polis pour les besoins de l'étude selon deux faces prismatiques parallèles. L'échantillon VM03 n'a pas été poli pour des raisons de fragilité, et l'échantillon VM07 a été conservé brut afin de garder une image de l'habitus général du set d'échantillons.



Figure 2: Set d'échantillon utilisé pour l'étude. De gauche à droite et de haut en bas : VM01 (0,68 ct ; 5,4 x 5,1 x 2,9 mm), VM02 (0,96 ct ; 5,9 x 4,4 x 3,9 mm), VM03 (0,72 ct ; 5,2 x 4,7 x 3,9 mm), VM04 (0,65 ct ; 4,9 x 4,5 x 3,1 mm), VM05 (0,77 ct ; 5,5 x 4,8 x 3,1 mm), VM06 (0,29 ct ; 4,8 x 3,9 x 1,9 mm) et VM07 (0,66 ct ; 6,9 x 3,1 x 3,1 mm).

#### 3.2. Gemmologie classique

Les échantillons ont été passés au polariscope, au dichroscope, à la lampe ultraviolets courts (UVC), à la lampe ultraviolets longs (UVL), et pesés à la balance hydrostatique. Le réfractomètre a été utilisé pour les échantillons VM01, VM02, VM03, VM05 et VM06 car les faces polies permettaient de faire les mesures d'indice de réfraction. Le conoscope n'a pas été utilisé car aucun échantillon n'étant poli selon les faces basales, l'observation selon l'axe optique est difficile pour cet instrument. Le spectroscope à main n'a pas été utilisé car les échantillons, très inclus, sont trop opaques pour une observation précise. Ces observations ont permis de vérifier les caractéristiques gemmologiques des émeraudes.

### 3.3. Micro-spectroscopie Raman

Des analyses ont été réalisées au micro-Raman sur les échantillons VM01, VM02, VM05 et VM06, dans l'émeraude et dans les inclusions solides. Elles ont été réalisées sur un Raman dispersif Labram HR. Les paramètres d'acquisition étaient : longueur d'onde de l'excitatrice de 514 nm ; fente de 100  $\mu\text{m}$  ; puissance de 150 mW ; plage d'acquisition maximale de 50 à 4000  $\text{cm}^{-1}$  ; temps d'acquisition classique de 3 x 10 s ; réseau de 2400 traits/mm ; résolution spectrale d'environ 1  $\text{cm}^{-1}$  ; objectif x50. Les échantillons étaient orientés avec le faisceau perpendiculaire à l'axe c. Ces observations ont permis d'aider à identifier les inclusions solides, en comparant leur spectre avec ceux effectués dans l'émeraude et ceux des références de la base de données du RRUFF.

### 3.4. Microscope électronique à balayage (MEB)

Un MEB a été utilisé pour étudier les échantillons VM01 et VM02, pour l'émeraude et pour les inclusions solides. Il s'agissait d'un JEOL 5800LV. L'utilisation de l'instrument a requis la métallisation au carbone des échantillons, ainsi que l'utilisation de laque d'argent. Les paramètres d'acquisition étaient : tension d'accélération de 15 kV ; courant de 0,5 nA. L'instrument a été utilisé pour effectuer de l'imagerie en électrons secondaires (SE), indiquant l'état de surface, et de l'imagerie en électrons rétrodiffusés (BSE). Ces dernières images représentent qualitativement la chimie de surface, les zones riches en éléments lourds apparaissant plus claires. L'instrument a également permis de faire des analyses chimiques quantitatives ponctuelles par dispersion d'énergie (EDS) pour les éléments plus lourds que le bore. Ces analyses ont été effectuées au grossissement maximal de l'instrument. Elles ont permis de comparer la chimie des échantillons à des formules minéralogiques idéales issues de la base de données de mindat.org.

### 3.5. Analyses complémentaires par spectroscopie infrarouge (IR)

Des analyses ont été réalisées au spectroscope IR à transformée de Fourier (FTIR) sur les échantillons VM01, VM02, VM04 et VM05. Elles ont été réalisées par transmission sur un FTIR Bruker Vertex 70. La plage d'acquisition s'étendait de 400 à 7000  $\text{cm}^{-1}$ , avec une résolution spectrale de 4  $\text{cm}^{-1}$ , et une accumulation classique de 100 scans après une mesure de « blanc » (mesure de l'air ambiant en tant que référence). Les échantillons étaient orientés avec le faisceau perpendiculaire à l'axe c. Les spectres ont été pris avant la préparation de faces polies sur les échantillons : des traces résiduelles peuvent donc rester après leur nettoyage et s'exprimer sous forme de liaisons C-H dans les spectres IR. Ces mesures ont permis d'observer qualitativement la présence de fluides dans les émeraudes.

## 4. Résultats

### 4.1. Gemmologie classique

Conformément aux données de gemdat.org pour les émeraudes, on observe deux indices de réfraction compris entre 1,565 et 1,602 ; la biréfringence varie entre 0,004 et 0,010 ; le signe optique est uniaxe négatif, et il existe un dichroïsme fort de vert à vert-bleu. Les échantillons rétablissent bien la lumière au quart de tour au polariscope et sont inertes aux UV. L'habitus en prisme hexagonal est présent. Aucune inclusion fluide n'a été observée.

La densité, normalement comprise entre 2,67 et 2,78, est ici un peu faible pour les échantillons VM01, VM05, VM06 et VM07, pouvant descendre jusqu'à 2,64 (VM06). Cela peut être dû à la très forte présence d'inclusions, susceptible de modifier la fourchette de valeurs possibles. Les méthodes de gemmologie classique permettent donc de vérifier que le set correspond bien à des émeraudes et est assez uniforme (Tableau 1).

|                       | VM01                                  | VM02  | VM03 | VM04           | VM05  | VM06  | VM07 |
|-----------------------|---------------------------------------|-------|------|----------------|-------|-------|------|
| Masse (ct)            | 0,68                                  | 0,96  | 0,72 | 0,65           | 0,77  | 0,29  | 0,66 |
| Indices de réfraction | 1,590                                 | 1,591 | /    | 1,592          | 1,592 | 1,590 | /    |
|                       | 1,600                                 | 1,600 | /    | 1,600          | 1,600 | 1,600 | /    |
| Biréfringence         | 0,010                                 | 0,009 | /    | 0,008          | 0,008 | 0,010 | /    |
| Signe optique         | Uniaxe négatif                        |       | /    | Uniaxe négatif |       |       | /    |
| Pléochroïsme          | Dichroïsme fort : Vert à Vert-Bleu    |       |      |                |       |       |      |
| Densité               | 2,65                                  | 2,74  | 2,67 | 2,71           | 2,66  | 2,64  | 2,64 |
| Polariscope           | Rétablit la lumière au quart de tour  |       |      |                |       |       |      |
| UVC                   | Inerte                                |       |      |                |       |       |      |
| UVL                   | Inerte                                |       |      |                |       |       |      |
| Particularités        | Riche en inclusions, prisme hexagonal |       |      |                |       |       |      |

Tableau 1 : Caractéristiques de gemmologie classique des échantillons VM01 à VM07 après préparation. Les données sont assez uniformes et décrivent bien des émeraudes, malgré une densité parfois faible.

### 4.2. Spectroscopie Raman, IR et chimie de l'émeraude

Les spectres seront décrits selon la position des pics indexés, et illustrés par des figures. Les valeurs soulignées correspondent aux pics principaux, et les valeurs entre parenthèse aux pics les plus mineurs. Une description supplémentaire sera rajoutée en cas de doublets, triplets, bandes larges, épaulements ou massifs.



Les spectres Raman des échantillons VM01, VM02, VM05 et VM06 sont présentés dans la Figure 3. Ils permettent d'indexer des pics isolés à 78, 248, 327, 400, 442, 521, 614 (avec un petit épaulement à 586  $\text{cm}^{-1}$ ), 689, 923, (1637) et (2329)  $\text{cm}^{-1}$ . Un triplet à 1013, 1071 et 1123  $\text{cm}^{-1}$  est présent, ainsi qu'un doublet à 3595 et 3608  $\text{cm}^{-1}$ . Ce dernier marque la présence d'eau dans l'émeraude. Une comparaison des spectres obtenus avec le spectre de référence du béryl du RRUFF numéro R040002, pour une excitatrice à 514 nm, montre une forte correspondance avec les données (Figure 3). Il s'agit d'une preuve supplémentaire pour identifier les échantillons comme étant des émeraudes.

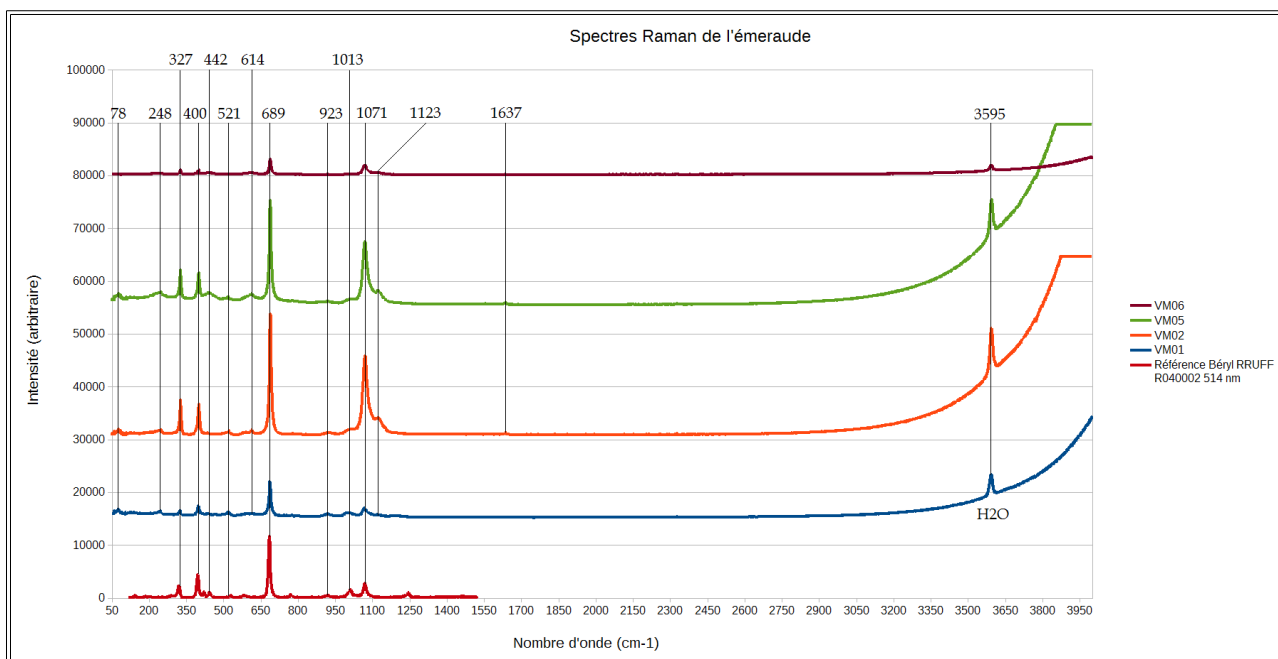


Figure 3: Spectres Ramans de l'émeraude pour les échantillons VM01 (VM01\_MicroRaman\_251017\_RéférenceBéryl), VM02 (VM02\_MicroRaman\_261017\_RéférenceBéryl), VM05 (VM05\_MicroRaman\_251017\_RéférenceBéryl) et VM06 (VM06\_MicroRaman\_251017\_RéférenceBéryl). Le spectre de référence du béryl RRUFF R040002 514 nm est ajouté pour comparaison. Les pics communs et visibles sur la figure sont indexés en  $\text{cm}^{-1}$ .

Les spectres IR des échantillons VM01, VM02, VM04 et VM05 sont présentés dans la Figure 4. Ils permettent d'indexer des pics isolés à 5596, (4936), (4826), (4627), (4321), (2672) et (2291)  $\text{cm}^{-1}$ . Un triplet est situé à 5339, 5277 et 5203  $\text{cm}^{-1}$ . Il est lié à une présence d'eau, avec le pic central lié à l'eau de type II (Rondeau, 2003). Un grand massif bruité est présent autour de 3600  $\text{cm}^{-1}$ , avec un épaulement à 3254  $\text{cm}^{-1}$ . Ce massif est lié à la présence d'eau de type I et II (Rondeau, 2003). Il s'accompagne d'un plus petit massif bruité autour de 3900  $\text{cm}^{-1}$  avec un épaulement à 4065  $\text{cm}^{-1}$ . Ce massif est lié à la présence de groupements OH (Rondeau, 2003). Un doublet à 2378 et 2359  $\text{cm}^{-1}$  est présent, et est lié à la présence de  $\text{CO}_2$  (Rondeau, 2003). Le doublet à 2960 et 2926  $\text{cm}^{-1}$  ainsi que le pic à 2855  $\text{cm}^{-1}$  ne sont pas à prendre en compte : en effet, ils sont liés à des liaisons C-H issues de traces ayant résisté au nettoyage des échantillons.



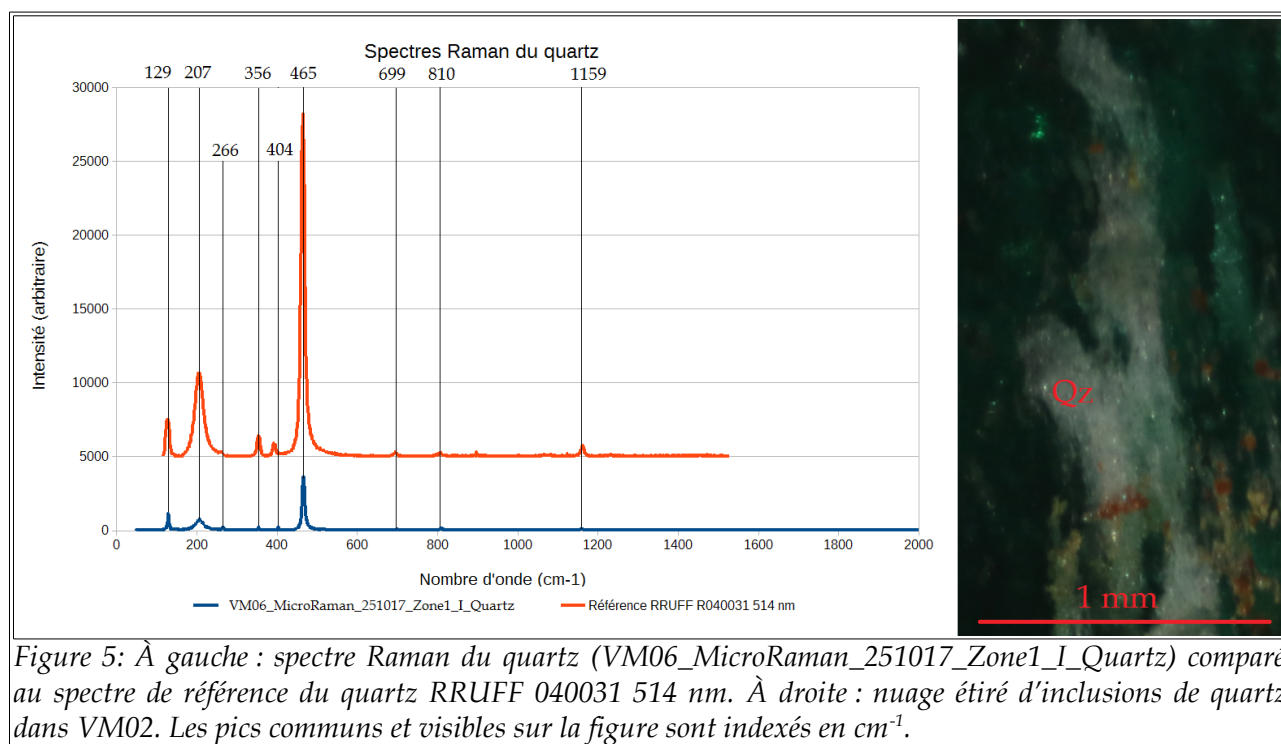
### 4.3. Identification des inclusions solides

Les inclusions sont listées par ordre de difficulté à leur donner un nom. Les sections 4.3.1 à 4.3.6 sont liées à des inclusions dont la détermination est immédiate. Les sections 4.3.7 à 4.3.12 sont liées à des inclusions dont la détermination est plus complexe, et qui seront rediscutées dans l'ordre au cours de sections 5.1.1 à 5.1.6. Les spectres Raman présentés ont été aplanis et corrigés des artefacts via le logiciel Crystal Sleuth.

Les spectres seront décrits selon la position des pics indexés, et illustrés par des figures. Les valeurs soulignées correspondent aux pics principaux, et les valeurs entre parenthèse aux pics les plus mineurs. Une description supplémentaire sera rajoutée en cas de doublets, triplets, bandes larges, épaulements ou massifs.

#### 4.3.1. Quartz

Le quartz est fortement présent dans les échantillons sous la forme de nuages de petites inclusions xénomorphes, de veines, ou d'inclusions automorphes de grande taille (Figure 5). Il est blanc et translucide. La Figure 5 présente le spectre Raman d'une inclusion de quartz de VM06. Les pics Raman indexés se situent à 129, 207 (bande large), 266, 356, 404, 465, (516), (699), (810), (1083), (1159) et (1232)  $\text{cm}^{-1}$ . La comparaison avec la référence du quartz du RRUFF numéro R040031, pour une excitatrice à 514 nm, montre une forte correspondance avec les données (Figure 5).



Le Tableau 3 présente la chimie d'une inclusion de quartz de VM01. Elle est composée quasiment purement de silicium et d'oxygène, avec une légère présence d'aluminium. On a environ 1,3 atomes d'oxygène pour 1 atome de silicium, ce qui est faible pour satisfaire la formule  $\text{SiO}_2$  du quartz, cependant l'oxygène est souvent sous-estimé dans les analyses EDS, et le bouclage n'est pas complet.

| Chimie (pourcentage atomique) |       |      | Bouclage (pourcentage de poids) |
|-------------------------------|-------|------|---------------------------------|
| O                             | Si    | Al   |                                 |
| 56,36                         | 43,03 | 0,23 | 83,93                           |

Tableau 3: Chimie du quartz (VM01\_EDSMEB\_031017\_Zone2\_SousZone1\_I\_Quartz).

#### 4.3.2. Rutile

Le rutile est fortement présent dans les échantillons sous la forme de petites inclusions très xénomorphes d'aspect cuivré, parfois organisées en nuages (Figure 6). La Figure 6 présente le spectre Raman d'une inclusion de rutile de VM01. Le spectre n'est formé que de pics larges ou de bandes larges, centrés à (125), 257, 434, (499), 612 (avec un épaulement à 701  $\text{cm}^{-1}$ ), (804) et (1000)  $\text{cm}^{-1}$ . La comparaison avec la référence du rutile du RRUFF numéro R040049, pour une excitatrice à 514 nm, montre une forte correspondance avec les données (Figure 6).

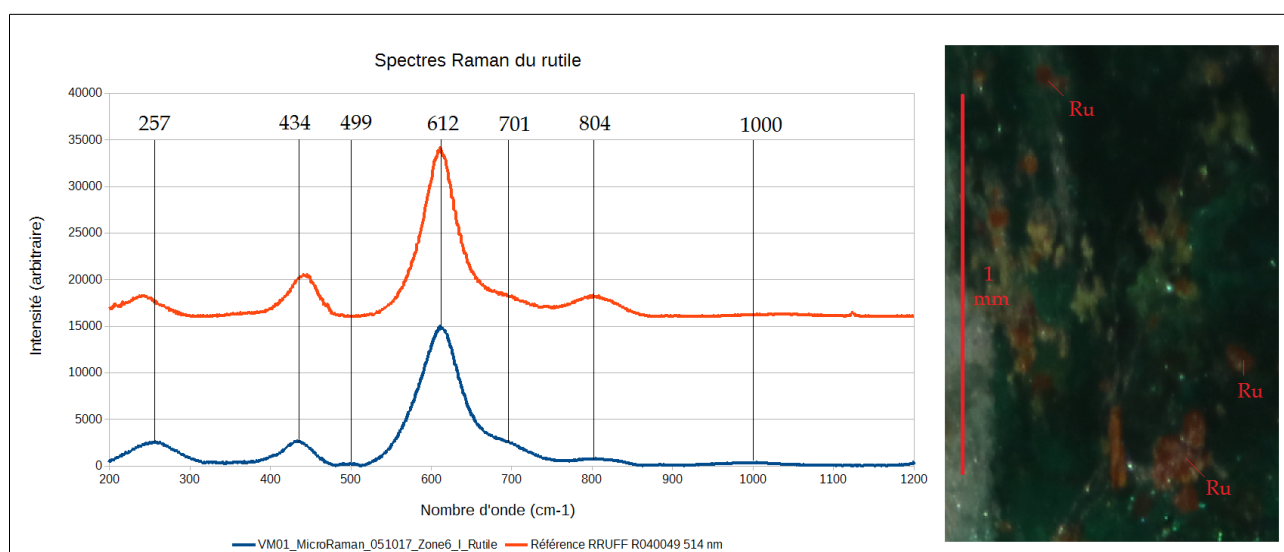


Figure 6: À gauche : spectre Raman du rutile (VM01\_MicroRaman\_051017\_Zone6\_I\_Rutile) comparé au spectre de référence du rutile RRUFF 040049 514 nm. À droite : inclusions de rutile dans VM02, isolées ou en nuage d'inclusions. Les pics communs et visibles sur la figure sont indexés en  $\text{cm}^{-1}$ .

Le Tableau 4 présente la chimie de la même inclusion de rutile. Elle est composée quasiment purement d'oxygène et de titane, avec une légère présence de silicium, de chrome, de fer et de niobium. On a environ 1,59 atomes d'oxygène pour 1 atome de titane, ce qui s'approche de la formule  $\text{TiO}_2$  du rutile. Le déficit en oxygène peut être expliqué pour les mêmes raisons que celles citées pour le quartz.

| Chimie (pourcentage atomique) |       |      |      |      |      | Bouclage (pourcentage de poids) |
|-------------------------------|-------|------|------|------|------|---------------------------------|
| O                             | Ti    | Si   | Cr   | Fe   | Nb   |                                 |
| 60,71                         | 38,13 | 0,55 | 0,27 | 0,16 | 0,11 | 87,51                           |

Tableau 4 : Chimie du rutile (VM01\_EDSMEB\_031017\_Zone6\_I\_Rutile).

### 4.3.3. Zircon

Le zircon est présent dans les échantillons sous la forme de petites inclusions xénomorphes souvent isolées (Figure 7). La Figure 7 présente le spectre Raman d'une inclusion de zircon de VM01. Les pics Raman indexés se situent à 204 et 212 et 224  $\text{cm}^{-1}$  (triplet), (327), 358, (391), (400), 439, 688, 975 et 1007  $\text{cm}^{-1}$  (doublet), et (1071)  $\text{cm}^{-1}$ . La comparaison avec la référence du zircon du RRUFF numéro R050488, pour une excitatrice à 532 nm, montre une forte correspondance avec les données (Figure 7).

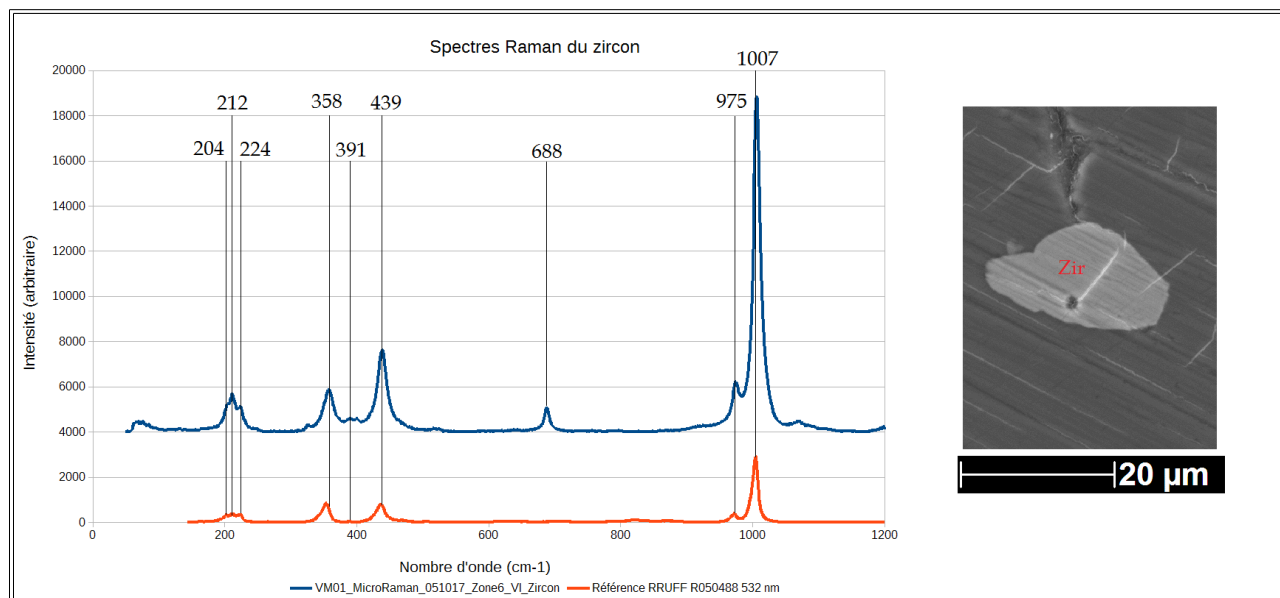


Figure 7: À gauche : spectre Raman du zircon (VM01\_MicroRaman\_051017\_Zone6\_VI\_Zircon) comparé au spectre de référence du zircon RRUFF 050488 532 nm. À droite : inclusion de zircon isolée observée en imagerie SE dans la Zone 13 de VM02. Les pics communs et visibles sur la figure sont indexés en  $\text{cm}^{-1}$ .

Le Tableau 5 présente la chimie d'une inclusion de zircon de VM01. Elle est composée d'oxygène, de zirconium et de silicium. On observe environ 2,58 atomes d'oxygène pour 1 atome de silicium, et 1 atome de zirconium pour un atome de silicium, ce qui s'approche bien de la formule  $\text{ZrSiO}_4$  du zircon malgré un déficit en oxygène, qui peut être expliqué pour les mêmes raisons que celles citées pour le quartz.

| Chimie (pourcentage atomique) |       |       | Bouclage (pourcentage de poids) |
|-------------------------------|-------|-------|---------------------------------|
| O                             | Zr    | Si    |                                 |
| 56,30                         | 21,97 | 21,83 | 86,27                           |

Tableau 5 : Chimie du zircon (VM01\_EDSMEB\_031017\_Zircon) (emplacement non indexé).



#### 4.3.4. Titanite

La titanite est présente dans les échantillons sous la forme de petites inclusions souvent automorphes et isolées, de couleur jaune pâle quand elles sont visibles à l'œil ou au microscope (Figure 8). La Figure 8 présente le spectre Raman d'une inclusion de titanite de VM01. Les pics Raman indexés se situent à 73, 146, 164, 236 (avec deux épaulements à 209 et 225)  $\text{cm}^{-1}$ , 256, 295, 319, (333), 353, (408), 427, 471, 550, 611 (avec un épaulement à 574  $\text{cm}^{-1}$ ), (769), 879 et 889  $\text{cm}^{-1}$  (doublet avec deux épaulements à 859 et 912  $\text{cm}^{-1}$ ), (945), 976, 1026, 1092, 1180, 1210, 1243, 1312 et 1453  $\text{cm}^{-1}$ . La comparaison avec la référence de la titanite du RRUFF numéro R050114, pour une excitatrice à 514 nm, montre une forte correspondance avec les données (Figure 8).

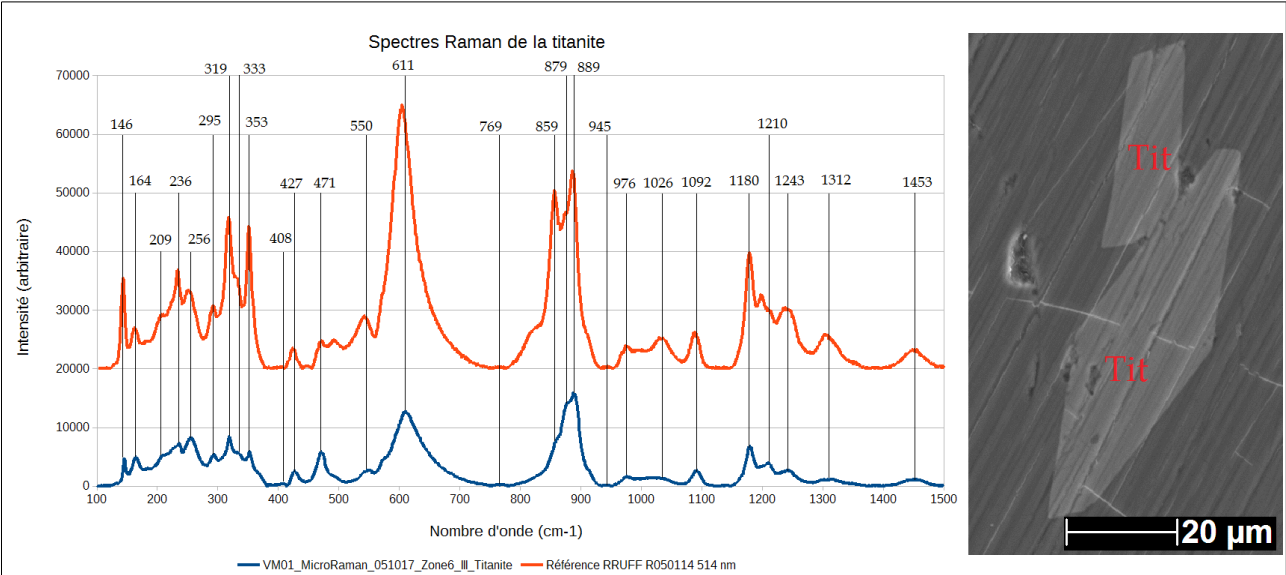


Figure 8: À gauche : spectre Raman de la titanite (VM01\_MicroRaman\_051017\_Zone6\_III\_Titanite) comparé au spectre de référence de la titanite RRUFF 050114 514 nm. À droite : inclusions de titanite automorphes observées en imagerie SE dans la Zone 12 de VM02. Les pics communs et visibles sur la figure sont indexés en  $\text{cm}^{-1}$ .

Le Tableau 6 présente la chimie de la même inclusion de titanite. Elle est composée quasiment purement d'oxygène, de silicium, de calcium et de titane avec une légère présence d'aluminium. On observe environ 3,92 atomes d'oxygène pour 1 atome de silicium, et des proportions à peu près équivalentes de silicium, de calcium et de titane. On s'approche donc bien de la formule  $\text{CaTi}(\text{SiO}_4)\text{O}$  de la titanite malgré un déficit en oxygène, qui peut être expliqué pour les mêmes raisons que celles citées pour le quartz.

| Chimie (pourcentage atomique) |       |       |       |      | Bouclage (pourcentage de poids) |
|-------------------------------|-------|-------|-------|------|---------------------------------|
| O                             | Si    | Ca    | Ti    | Al   |                                 |
| 57,69                         | 14,70 | 13,88 | 13,00 | 0,73 | 87,61                           |

Tableau 6 : Chimie de la titanite (VM01\_EDSMEB\_031017\_Zone6\_III\_Titanite).

### 4.3.5. Fluorapatite

Une seule inclusion de fluorapatite sub-automorphe a été trouvée dans VM01 (Figure 9). La Figure 9 présente le spectre Raman de cette inclusion. Les pics Raman indexés se situent à 141, (246), 327, 400, 433 et 449  $\text{cm}^{-1}$  (doublet), (522), 584 et 593  $\text{cm}^{-1}$  (doublet), (607) et (617)  $\text{cm}^{-1}$  (doublet), 688, (919), 967, (1036), (1043) et 1071  $\text{cm}^{-1}$ . La comparaison avec la référence de la fluorapatite du RRUFF numéro R050194, pour une excitatrice à 780 nm, montre une bonne correspondance avec les données (Figure 9).

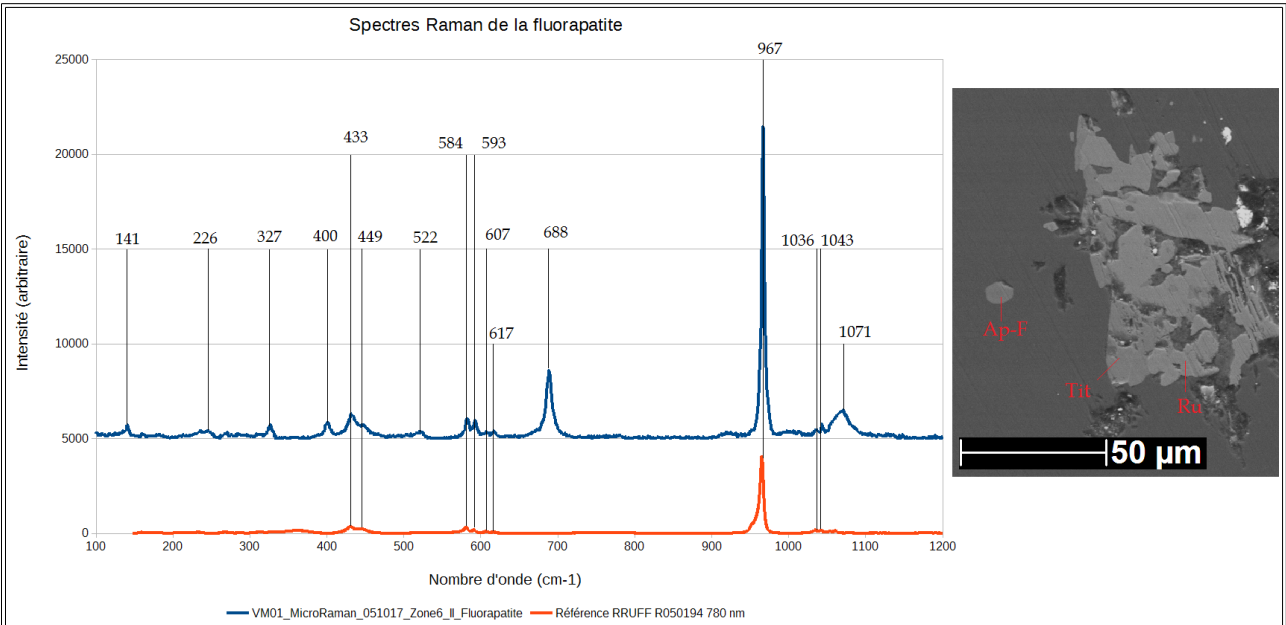


Figure 9: À gauche : spectre Raman de la fluorapatite (VM01\_MicroRaman\_051017\_Zone6\_II\_Fluorapatite) comparé au spectre de référence de la fluorapatite RRUFF 050194 780 nm. À droite : inclusion de fluorapatite sub-automorphe au voisinage d'un complexe de rutile et de titanite, observés en imagerie BSE dans la Zone 6 de VM01. Les pics communs et visibles sur la figure sont indexés en  $\text{cm}^{-1}$ .

Le Tableau 7 présente la chimie de cette inclusion. Elle est composée quasiment purement d'oxygène, de calcium, de phosphore et de fluor, avec une légère présence de silicium. En comptant que la formule de la fluorapatite  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$  comporte 21 atomes, rapporter les teneurs à 21 donne : 6,02 Ca, 3,5 P, 9,66 O et 1,74 F, ce qui se rapproche de la formule de la fluorapatite malgré quelques écarts et un fort déficit en oxygène. Ces écarts peuvent s'expliquer par le bouclage à 88,39 % et les problèmes d'analyse liés à l'oxygène.

| Chimie (pourcentage atomique) |       |       |      |      | Bouclage (pourcentage de poids) |
|-------------------------------|-------|-------|------|------|---------------------------------|
| O                             | Ca    | P     | F    | Si   |                                 |
| 45,98                         | 28,68 | 16,67 | 8,28 | 0,39 | 88,39                           |

Tableau 7 : Chimie de la fluorapatite (VM01\_EDSMEB\_031017\_Zone6\_II\_Fluorapatite).

#### 4.3.6. Talc

Le talc est présent dans les échantillons sous forme de larges amas étirés et plus rarement de petits individus isolés xénomorphes. Il est de couleur jaune-brun clair. Il peut former la majorité des inclusions des échantillons (Figure 10). La Figure 10 présente le spectre Raman d'une inclusion de talc de VM01. Les pics Raman indexés se situent à 100 et 115  $\text{cm}^{-1}$  (doublet), 194, (229), 291, 358 (avec un épaulement à 378  $\text{cm}^{-1}$ ), 432, 452, 469, 677, 790, 1010, 1050, (1356) (bande large très aplatie) et (1595) (bande large très aplatie)  $\text{cm}^{-1}$ . La comparaison avec la référence du talc du RRUFF numéro 050087, pour une excitatrice à 514 nm, montre une forte correspondance avec les données (Figure 10).

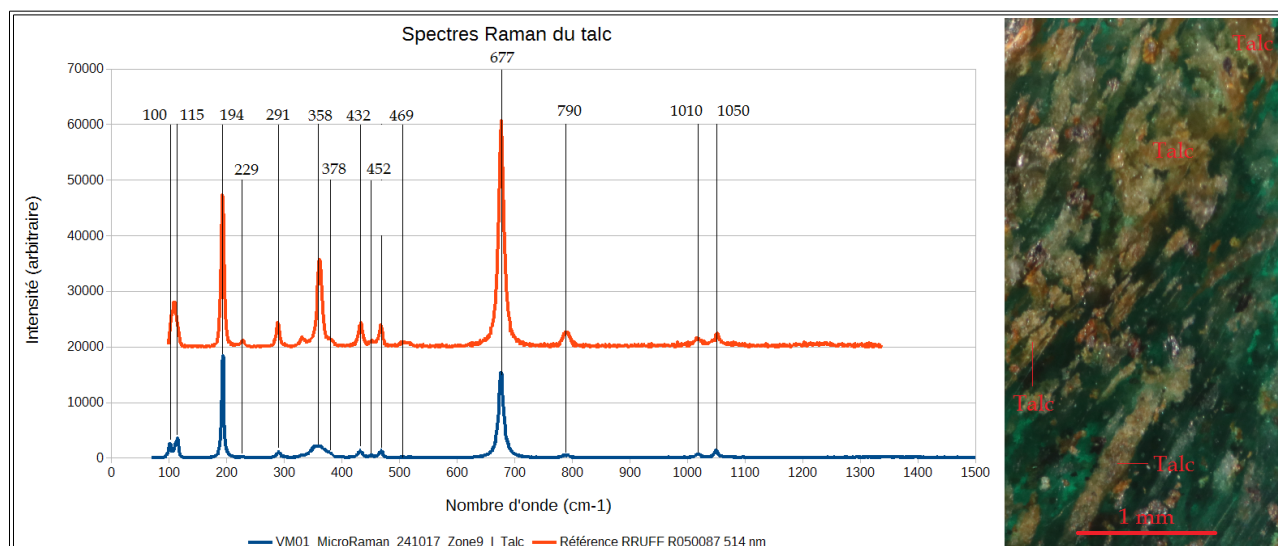


Figure 10: À gauche : spectre Raman du talc (VM01\_MicroRaman\_241017\_Zone9\_I\_Talc) comparé au spectre de référence du talc RRUFF 050087 514 nm. À droite : paysage d'inclusions majoritairement composé de talc dans VM01. Les pics communs et visibles sur la figure sont indexés en  $\text{cm}^{-1}$ .

La Tableau 8 présente la chimie de la même inclusion de talc. Elle est composée principalement d'oxygène, de silicium et de magnésium, avec une présence de fer et d'aluminium. En comptant que la formule du talc  $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  comporte 19 atomes en ignorant l'hydrogène, rapporter les teneurs à 19 atomes donne : 3,24 Mg, 5,21 Si et 10,02 O, ce qui se rapproche de la formule du talc malgré quelques écarts, qui peuvent s'expliquer par le bouclage à 85,17 % et les erreurs de mesure liés à l'oxygène.

| Chimie (pourcentage atomique) |       |       |      |      | Bouclage (pourcentage de poids) |
|-------------------------------|-------|-------|------|------|---------------------------------|
| O                             | Si    | Mg    | Fe   | Al   |                                 |
| 52,75                         | 27,43 | 17,07 | 1,64 | 0,55 | 85,17                           |

Tableau 8 : Chimie du talc (VM01\_EDSMEB\_261017\_Zone9\_I\_Talc).

4.3.7. Aluminosilicate de fer, de calcium et de cérium

Dans les échantillons étudiés, on trouve souvent des inclusions noires, d’éclat moyen et de forme souvent hexagonale, parfaitement automorphes à sub-automorphes (Figure 11). Ce sont des inclusions assez présentes dans les échantillons, souvent sous forme d’individus isolés. Le spectre Raman d’une de ces inclusions dans VM01 est présenté en Figure 11. Les pics Raman indexés sont situés à 70, 121 et 133 cm<sup>-1</sup> (doublet), 190 et 219 cm<sup>-1</sup> (doublet), (249), 273, 316, 353, 381, 422 et 450 cm<sup>-1</sup> (doublet), 488, 579, 685, 873, 921, 958, 1039 et 1758 (bande large très aplatie) cm<sup>-1</sup>.

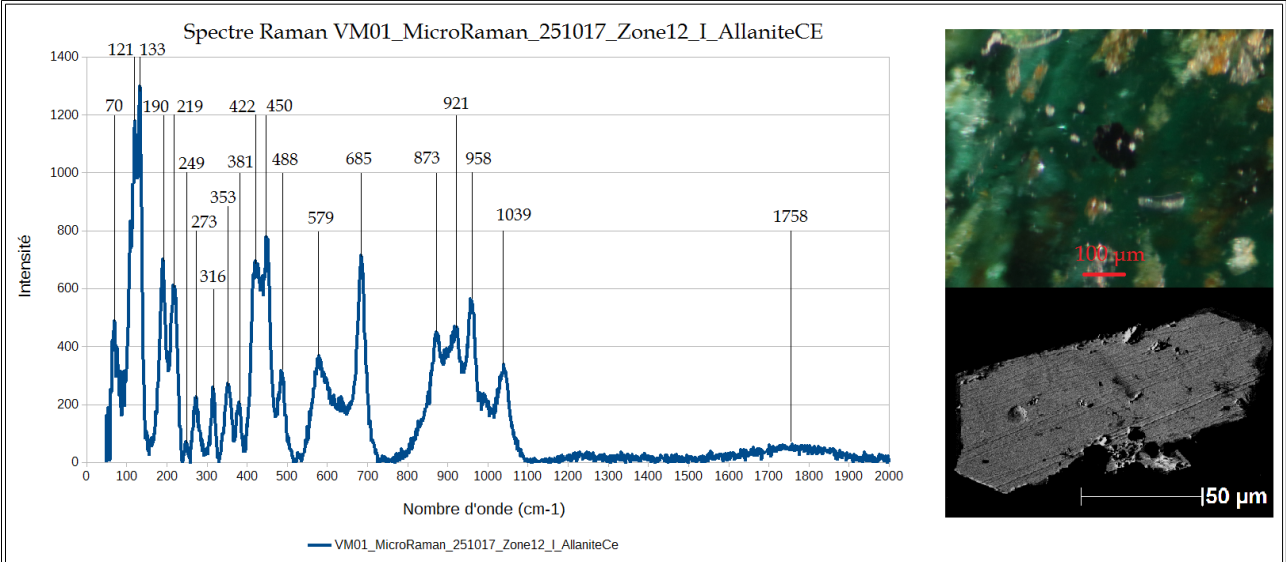


Figure 11: À gauche : spectre Raman VM01\_MicroRaman\_251017\_Zone12\_I\_AllaniteCe. À droite en haut: inclusion noire automorphe en prisme hexagonal trapu dans la Zone 12 de VM01. À gauche en bas : inclusion sub-automorphe en prisme hexagonal allongé dans la Zone 11 de VM01, en imagerie BSE. Les pics visibles sur la figure sont indexés en cm<sup>-1</sup>.

Le Tableau 9 présente la chimie de la même inclusion. Elle est composée principalement d’oxygène, de silicium, d’aluminium, de fer et de calcium, avec une forte présence de cérium (environ 2 % atomique) et une légère présence de lanthane. Il s’agit donc d’un aluminosilicate de fer, de calcium et probablement de cérium. Le bouclage est assez faible, les données doivent donc être prises avec précaution.

| Chimie (pourcentage d’atomes) |       |      |      |      |      |      | Bouclage (pourcentage de poids) |
|-------------------------------|-------|------|------|------|------|------|---------------------------------|
| O                             | Si    | Al   | Fe   | Ca   | Ce   | La   |                                 |
| 58,19                         | 18,74 | 8,50 | 6,24 | 6,08 | 1,93 | 0,32 | 71,84                           |

Tableau 9 : Résultats EDS pour VM01\_EDSMEB\_261017\_Zone12\_I\_AllaniteCe.

#### 4.3.8. Aluminosilicate de magnésium et de fer

Dans les échantillons étudiés, on trouve parfois des inclusions de faible éclat, xénomorphes étirées, souvent associées au talc et légèrement plus lourdes en imagerie BSE. On peut aussi les trouver en tant qu'individus isolés (Figure 12). Le spectre Raman d'une de ces inclusions dans VM02 est présenté en Figure 12. Le signal de l'inclusion est dominé par celui de l'émeraude. En effet, l'inclusion est assez petite (10  $\mu\text{m}$  de large). Cependant, en comparant le signal à celui de référence de l'émeraude pour l'échantillon VM02, on peut isoler les pics caractéristiques suivants : (102), (127), 204, (355) (bande large), 472, 551 et (670) (épaulement)  $\text{cm}^{-1}$ .

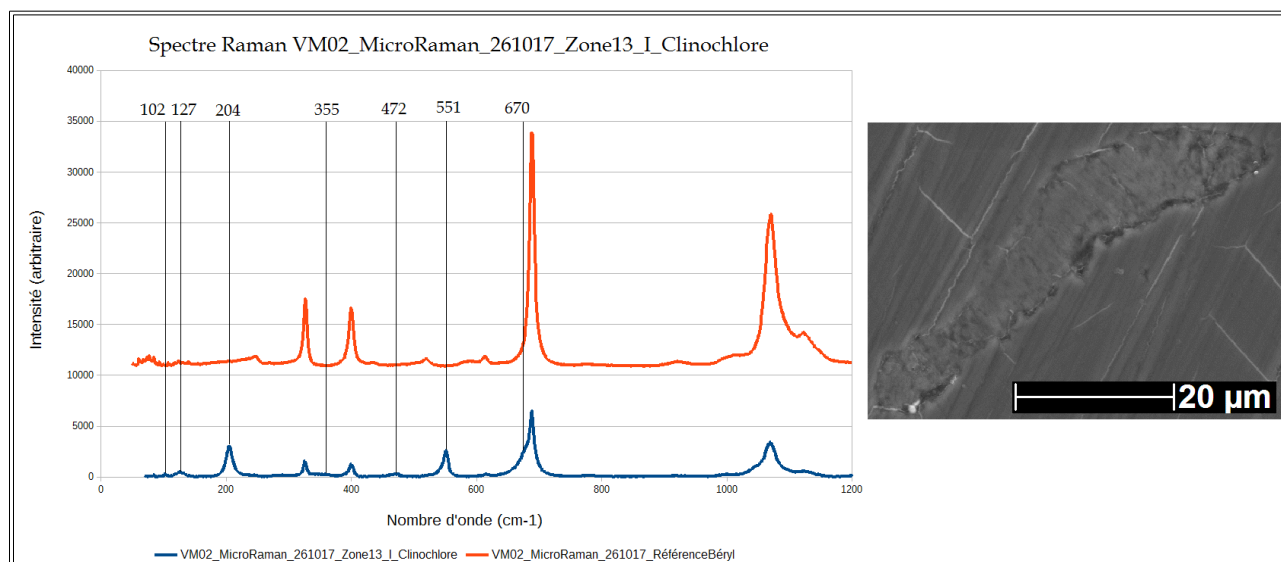


Figure 12: À gauche : spectre Raman VM02\_MicroRaman\_261017\_Zone13\_I\_Clinochlore comparé à celui de l'émeraude (VM02\_MicroRaman\_261017\_RéférenceBéryl). Les pics indexés (en  $\text{cm}^{-1}$ ) sont les pics caractéristiques du spectre de l'inclusion, qui n'apparaissent pas sur le spectre de l'émeraude. À droite : inclusion xénomorphe allongée dans la Zone 13 de VM02, en imagerie SE.

Le Tableau 10 présente la chimie de la même inclusion. Elle est composée principalement d'oxygène, de magnésium, de silicium, d'aluminium, avec une très forte présence de fer (environ 5 % atomique) et une légère présence de chrome. Il s'agit donc d'un alumino-silicate de magnésium et probablement de fer. Le bouclage est assez faible, les données doivent donc être prises avec précaution.

| Chimie (pourcentage d'atomes) |       |       |       |      |      | Bouclage (pourcentage de poids) |
|-------------------------------|-------|-------|-------|------|------|---------------------------------|
| O                             | Mg    | Si    | Al    | Fe   | Cr   |                                 |
| 48,68                         | 17,74 | 15,82 | 10,71 | 5,18 | 0,83 | 69,22                           |

Tableau 10 : Résultats EDS pour VM02\_EDSMEB\_261017\_Zone13\_I\_Clinochlore.

#### 4.3.9. Oxyde de fer

Dans l'échantillon VM02, on trouve trois petites inclusions à l'intérieur d'un rutile,. Elles sont de poids chimique uniforme et supérieur à celui du rutile en imagerie BSE, trapues, et de très petite taille (inférieures à 5  $\mu\text{m}$  de large) (Figure 13). La dimension des inclusions n'a pas permis d'obtenir un spectre Raman de ces inclusions, cependant une analyse chimique a pu être réalisée et est présentée dans le Tableau 11.



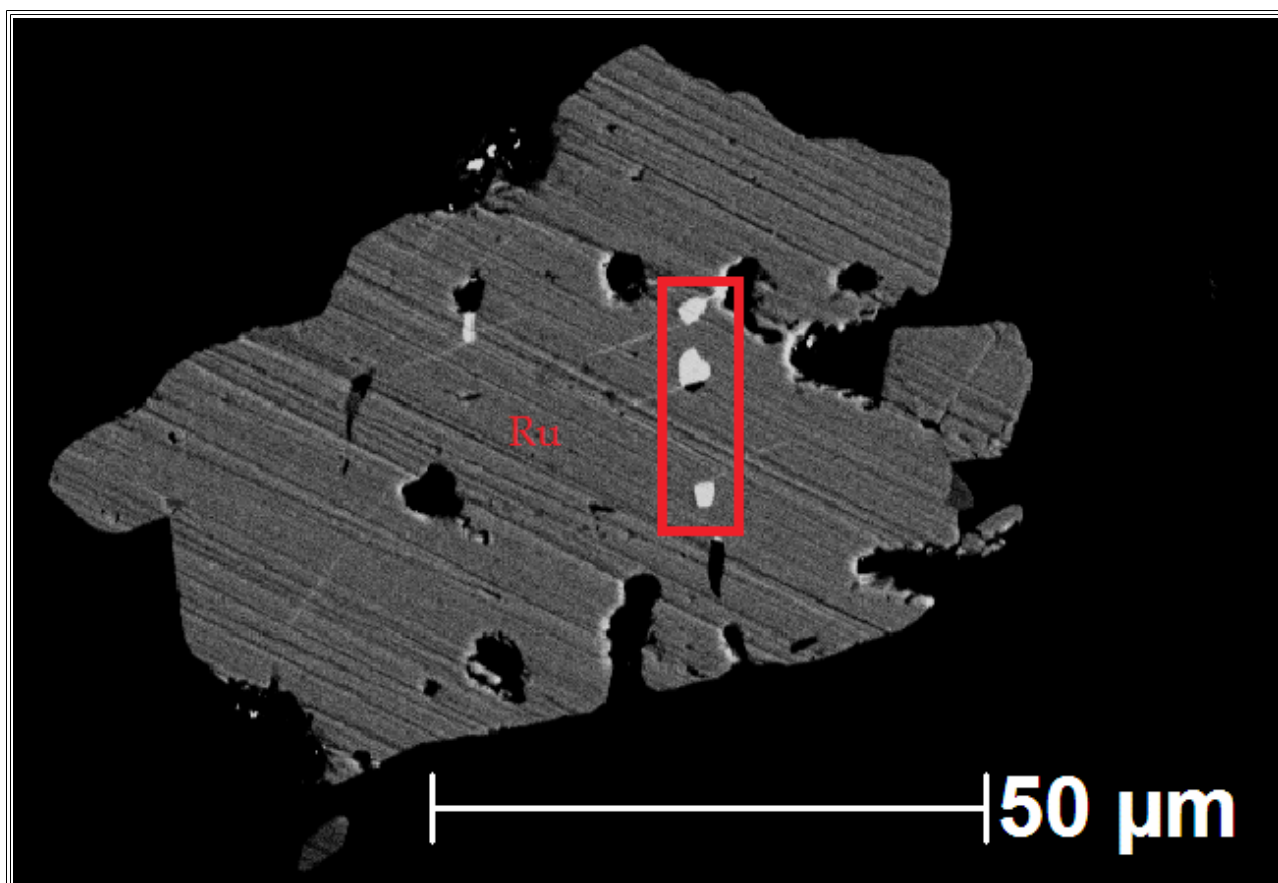


Figure 13: Groupement de trois inclusions trapues de fort poids chimique (blanches) dans un rutile xénomorphe (gris) dans la Zone 10 de VM02, en imagerie BSE.

Ces inclusions sont principalement composées de fer et d'oxygène, avec une très forte présence de titane (environ 5,5 % atomique) et une légère présence de chrome. Le titane est cependant dix fois moins abondant que le fer, qui représente environ 50 % des atomes de l'inclusion. Il s'agit donc probablement d'un oxyde de fer.

| Chimie (pourcentage d'atomes) |       |      |      | Bouclage (pourcentage de poids) |
|-------------------------------|-------|------|------|---------------------------------|
| Fe                            | O     | Ti   | Cr   |                                 |
| 50,09                         | 41,87 | 5,58 | 0,82 | 83,4                            |

Tableau 11 : Résultats EDS pour VM02\_EDSMEB\_261017\_Zone10\_I\_Hématite.

#### 4.3.10. Minéral de pic caractéristique à 1084 cm<sup>-1</sup>

Dans l'échantillon VM02, on trouve une petite inclusion xénomorphe dans un rutile, de taille inférieure à 5 μm de large, et de faible poids chimique en imagerie BSE (Figure 14). Son analyse chimique n'a pas été réalisée, mais un spectre Raman a été obtenu dessus, présenté dans la Figure 14. Du fait de la petite taille de l'inclusion, son signal est dominé par celui du rutile environnant, cependant un pic se détache très clairement à la position 1084 cm<sup>-1</sup>.



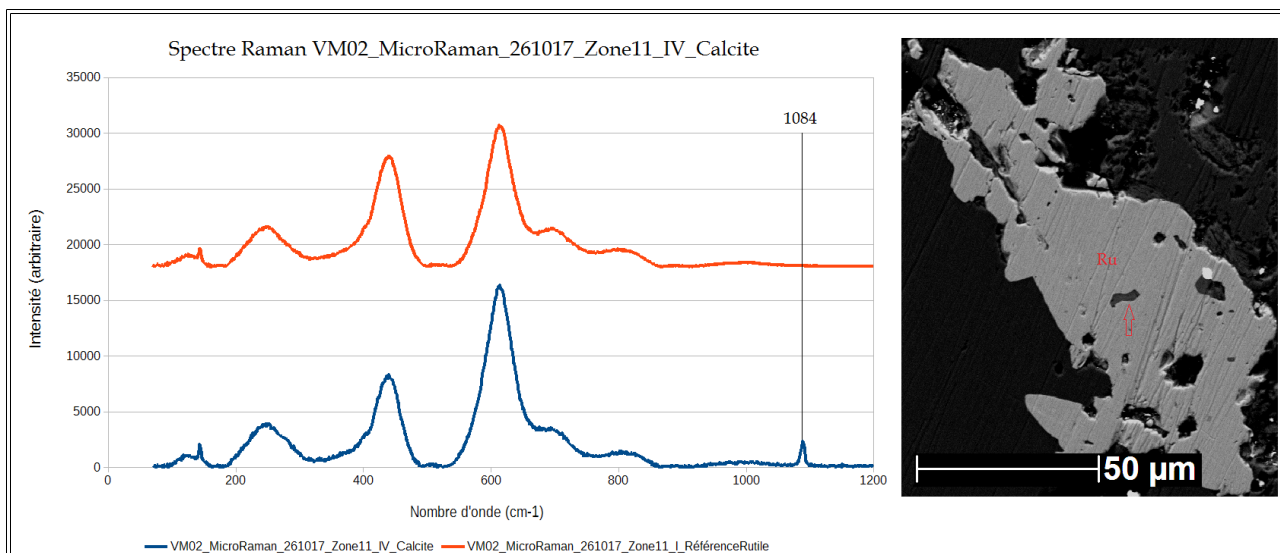


Figure 14: À gauche : spectre Raman VM02\_MicroRaman\_261017\_Zone11\_IV\_Calcite comparé à celui du rutile (VM02\_MicroRaman\_261017\_Zone11\_I\_RéférenceRutile). Le pic indexé à 1084  $\text{cm}^{-1}$  est le seul à sortir du signal du rutile et à être caractéristique du spectre. À droite : inclusion xénomorphe de faible poids chimique dans un rutile xénomorphe, dans la Zone 11 de VM02, en imagerie BSE.

#### 4.3.11. Silicate d'yttrium, de calcium, de fer et de terres rares

Dans les échantillons étudiés, on trouve souvent de petites inclusions très xénomorphes, de grand poids chimique en BSE, inférieures à 10 μm de large, et souvent organisées en petits groupements d'individus (Figure 15). Un signal Raman a été obtenu sur une de ces inclusions dans VM01 (Figure 15). Le signal est dominé par celui de l'émeraude, mais on peut isoler quelques pics situés à 184, (328) (fort élargissement du pic) et 918 (pic large beaucoup plus important que celui de l'émeraude)  $\text{cm}^{-1}$ .

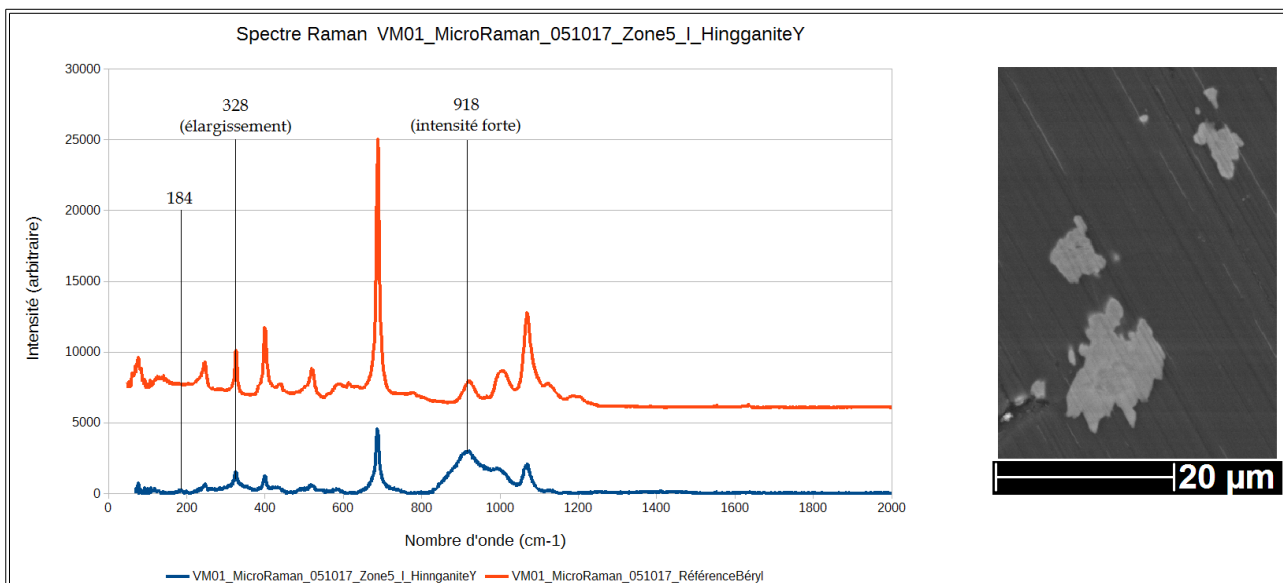


Figure 15: À gauche : spectre Raman VM01\_MicroRaman\_051017\_Zone5\_I\_HingganiteY comparé à celui de l'émeraude (VM01\_MicroRaman\_051017\_RéférenceBéryl). Trois pics caractéristiques sont indexés en  $\text{cm}^{-1}$ . À droite : groupe d'inclusions très xénomorphes, dans la Zone 5 de VM01 (Image SE).

Le Tableau 12 présente la chimie de la même inclusion. Elle est principalement constituée d'oxygène, de silicium, d'yttrium, de calcium, de fer et de terres rares (Gd, Sm, Ce, La), avec une présence de magnésium et d'aluminium. Il s'agit donc d'un silicate d'yttrium et probablement de calcium, de fer et de terres rares.

| Chimie (pourcentage d'atomes) |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      | Bouclage<br>(pourcentage de poids) |
|-------------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------------------------|
| O                             | Si    | Y    | Ca   | Fe   | Mg   | Al   | Gd   | Sm   | Ce   | La   |                                    |
| 61,56                         | 17,79 | 8,67 | 3,77 | 2,56 | 1,48 | 1,18 | 1,11 | 0,86 | 0,82 | 0,20 | 80,91                              |

Tableau 12: Résultats EDS pour VM01\_EDSMEB\_261017\_Zone5\_I\_HingganiteY.

#### 4.3.12. Phosphate-carbonate de cérium et de lanthane

Dans l'échantillon VM02, on trouve une petite inclusion trapue dans un rutile, à environ 20  $\mu\text{m}$  de celle présentée en 4.3.10. Elle est de taille inférieure à 5  $\mu\text{m}$  et montre un fort poids chimique en imagerie BSE (Figure 16). Un spectre Raman a été obtenu sur cette inclusion et est présenté en Figure 16. Du fait de sa petite taille, son signal est dominé par celui du rutile, mais un pic ressort cependant à 194  $\text{cm}^{-1}$ . Deux bandes larges sont observées à 1355 et 1599  $\text{cm}^{-1}$ , mais il s'agit probablement d'artefacts. En effet, celles-ci ont également été observées dans d'autres mesures (Annexe section 8.1 : VM01\_MicroRaman\_261017\_Zone9\_III\_Indéterminé) sur d'autres inclusions.

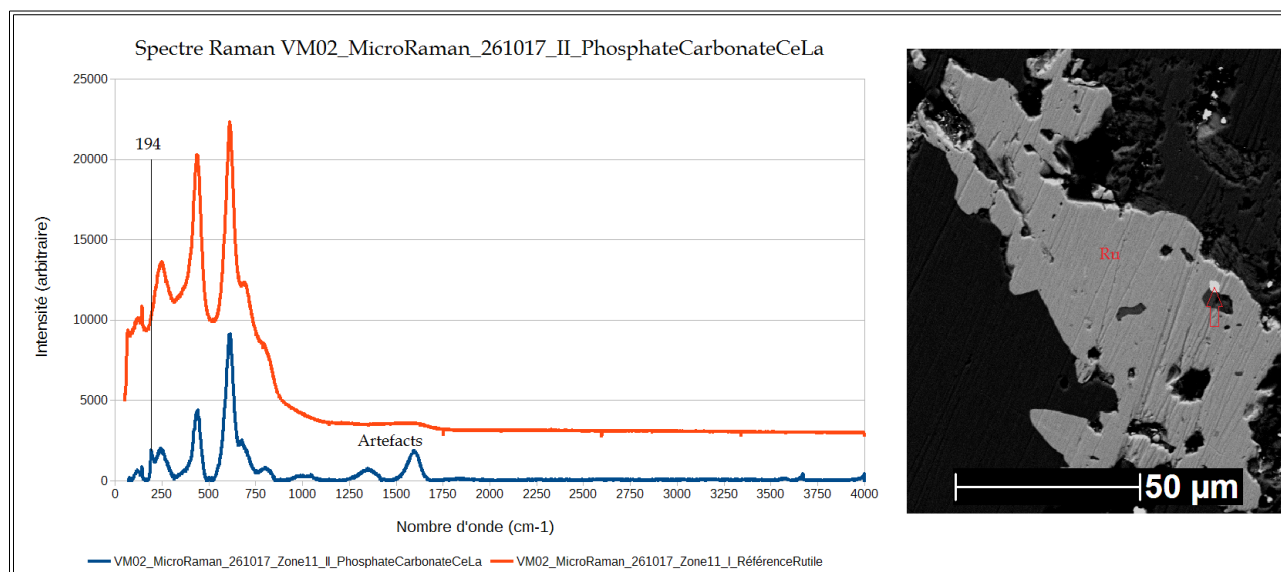


Figure 16: À gauche : spectre Raman VM02\_MicroRaman\_261017\_Zone11\_II\_PhosphateCarbonateCeLa comparé à celui du rutile (VM02\_MicroRaman\_261017\_Zone11\_I\_RéférenceRutile). Le seul pic caractéristique qui se démarque du signal du rutile se situe à 194  $\text{cm}^{-1}$ . À droite : inclusion trapue de fort poids chimique dans un rutile xénomorphe, dans la Zone 11 de VM02, en imagerie BSE.

Le Tableau 13 présente la chimie de la même inclusion. Elle est composée principalement de carbone (présent en trop grande quantité pour être uniquement dû à la métallisation des échantillons), d'oxygène, de phosphore, de cérium et de lanthane, avec une présence de titane et de fluor. Le titane est probablement un artefact dû au rutile environnant. Le bouclage en excès (115,99%) est probablement dû à la comptabilisation du carbone de la métallisation dans la chimie. Il s'agit probablement d'un phosphate-carbonate de cérium et de lanthane.

| Chimie (pourcentage d'atomes) |       |      |      |      |      |      | Bouclage (pourcentage de poids) |
|-------------------------------|-------|------|------|------|------|------|---------------------------------|
| C                             | O     | P    | Ce   | La   | Ti   | F    |                                 |
| 63,04                         | 20,69 | 6,84 | 4,07 | 2,31 | 1,45 | 1,39 | 115,99                          |

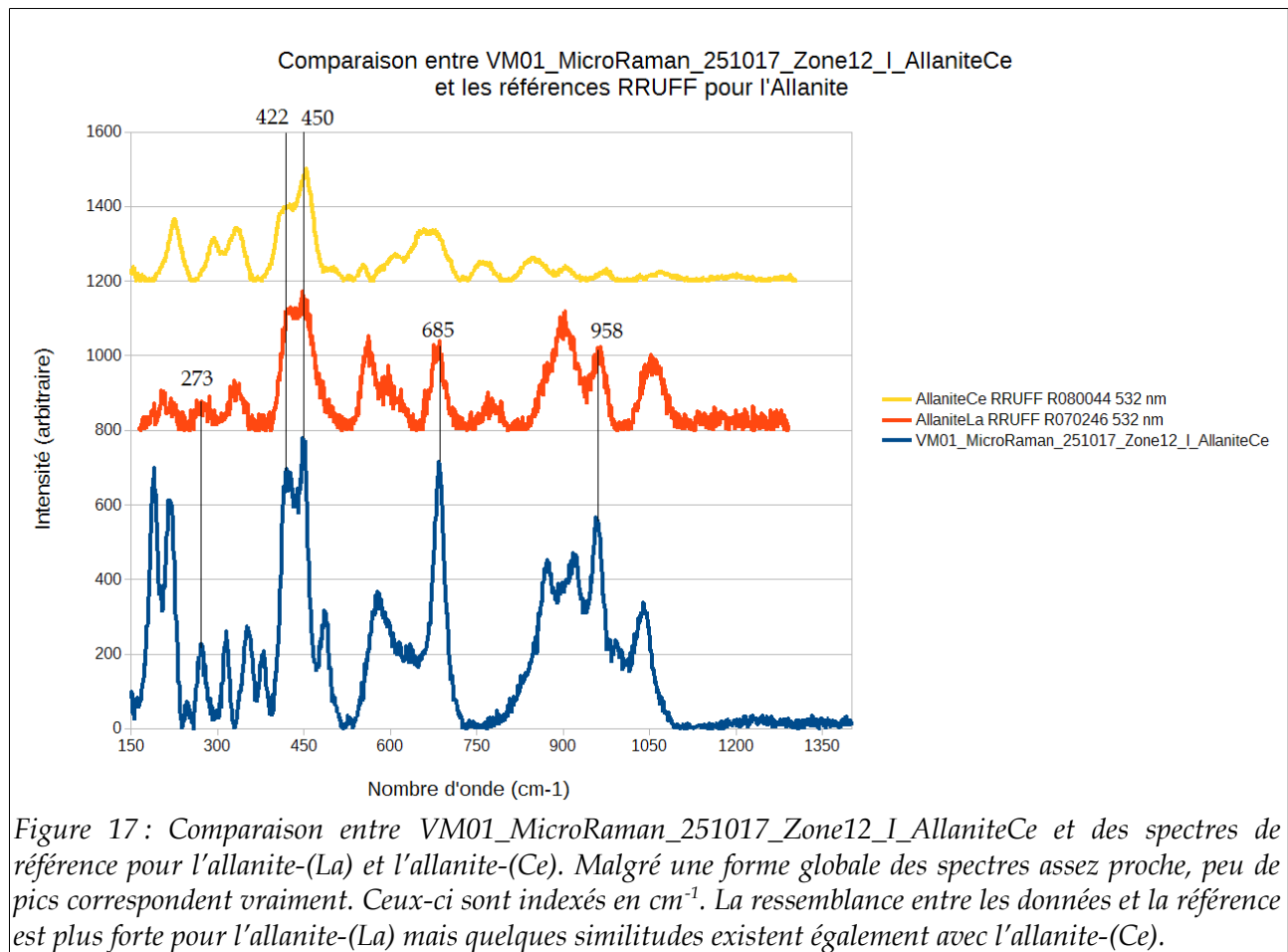
*Tableau 13 : Résultats EDS pour VM02\_EDSMEB\_261017\_Zone11\_II\_PhosphateCarbonateCeLa.*

## 5. Discussion

### 5.1. Détermination des inclusions à identification complexe

#### 5.1.1. Allanite-(Ce)

Le spectre Raman de l'inclusion décrite dans la section 4.3.7 (aluminosilicate de fer, de calcium et de cérium) a été comparé aux spectres Raman de la base de données du RRUFF afin de trouver la meilleure correspondance entre les données et un spectre de référence. Celle-ci (71 % de ressemblance) correspond au spectre de l'allanite-(La) numéro R070246, pour une excitatrice à 532 nm. Les pics ne correspondent pas parfaitement, mais on trouve quelques similitudes pour les pics à 273, 422 et 450, 685 et 958  $\text{cm}^{-1}$ . (Figure 17).



Cependant, la chimie de l'inclusion, plus riche en cérium qu'en lanthane (Tableau 9), est plus compatible avec l'allanite-(Ce), de formule  $\{\text{CaCe}\}\{\text{Al}_2\text{Fe}^{2+}\}(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH})$ . La formule contenant 21 atomes en ignorant l'hydrogène, ramener les teneurs à 21 donne : 1,28 Ca, 0,41 Ce (plus 0,07 La), 1,79 Al, 1,31 Fe, 3,94 Si et 12,22 O. On approche bien la formule de l'allanite-(Ce) malgré quelques marges d'erreur probablement dues au bouclage faible (71,84%).

En comparant les données avec le spectre de référence de l'allanite-(Ce) du RRUFF numéro R080044, pour une excitatrice à 532 nm, on remarque que la correspondance est moins bonne que pour l'allanite-(La) : seuls les pics à 422 et 450  $\text{cm}^{-1}$  correspondent encore (Figure 17). Le spectre de référence reste cependant assez proche des données pour faire l'hypothèse qu'il s'agit bien d'allanite-(Ce). En effet, la chimie quantitative est un indicateur fort de ce minéral.

### 5.1.2. Clinocllore

La chimie de l'inclusion décrite dans la section 4.3.8 (aluminosilicate de magnésium et de fer) est assez représentative du clinocllore, un mica du groupe des chlorites de formule  $\text{Mg}_5\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$ . La formule comprenant 28 atomes en ignorant l'hydrogène, rapporter les teneurs du Tableau 10 à 28 donne : 4,97 Mg, 3,00 Al, 4,43 Si et 13,63 O, des valeurs qui s'approchent de la formule du clinocllore malgré une surestimation du magnésium, de l'aluminium et du silicium. Cela est probablement dû à la sous-estimation de l'oxygène ainsi qu'au faible bouclage (69,22%), qui tirent les autres valeurs vers le haut.

De plus, en comparant les pics caractéristiques dans le spectre Raman (102, 127, 204, 355 (bande large), 472, 551 et 670 (épaulement)  $\text{cm}^{-1}$ ) avec le spectre de référence du clinocllore du RRUFF numéro R061080, pour une excitatrice à 532 nm, on observe que tous les pics caractéristiques situés dans la même plage que la référence correspondent exactement à des pics de la référence (Figure 18). Il s'agit d'un argument fort pour confirmer que l'inclusion est un clinocllore.

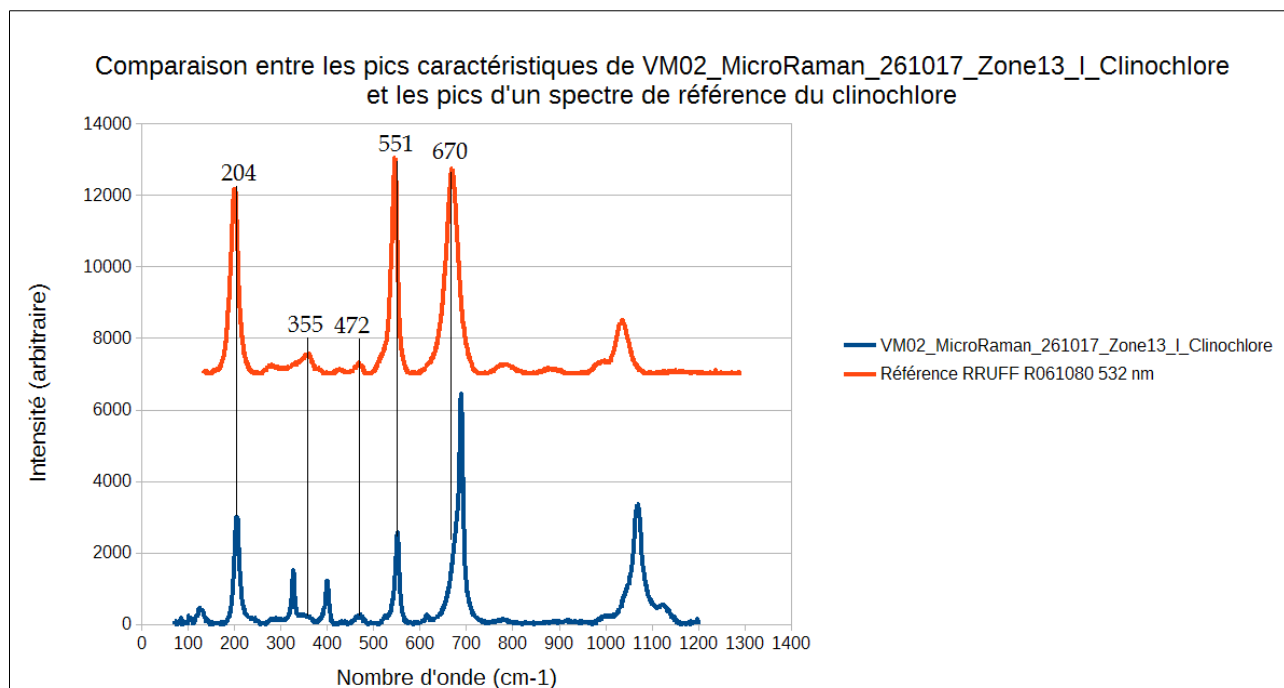


Figure 18: Comparaison entre les pics caractéristiques de VM02\_MicroRaman\_261017\_Zone13\_I\_Clinocllore et un spectre de référence pour le clinocllore. Tous les pics caractéristiques correspondent à un pic dans la référence du clinocllore.

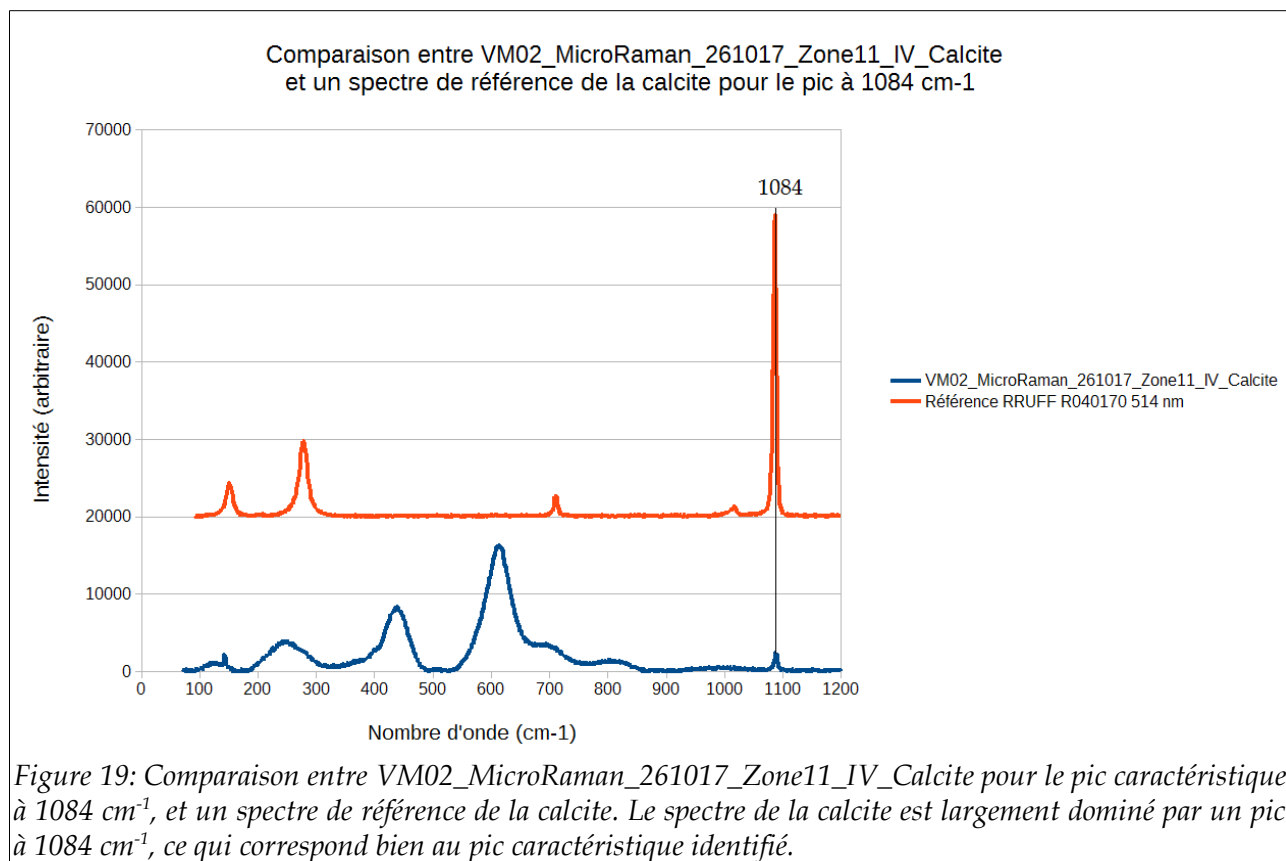
### 5.1.3. Hématite

La chimie de l'inclusion décrite dans la section 4.3.9 (oxyde de fer) montre une proportion d'environ 1,20 atome de fer pour 1 atome d'oxygène. En comptant que l'oxygène est souvent sous-estimé dans les mesures, et que le bouclage est incomplet (83,49%), il est tout à fait possible que cette inclusion correspondent en réalité à de l'hématite, de formule  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , avec environ 0,67 atome de fer pour 1 atome d'oxygène. Le titane, dix fois moins concentré que le fer, est en trop faible quantité pour soutenir l'hypothèse de l'ilménite  $\text{FeTiO}_3$ .

### 5.1.4. Calcite

L'inclusion décrite dans la section 4.3.10 (minéral de pic caractéristique à  $1084\text{ cm}^{-1}$ ) est située de façon très proche (environ  $20\text{ }\mu\text{m}$ ) du phosphate-carbonate décrit en section 4.3.12. Elle est donc potentiellement riche en calcium et en carbone, et l'inclusion montre un assez faible poids chimique en imagerie BSE par rapport au rutile et au phosphate-carbonate voisins. On a donc testé l'hypothèse de la calcite  $\text{CaCO}_3$ .

Le pic caractéristique très marqué dans le signal Raman se situe à  $1084\text{ cm}^{-1}$ . En observant le spectre de référence de la calcite du RRUFF numéro R040170, pour une excitatrice à  $514\text{ nm}$ , on observe que celui-ci est largement dominé par un pic à  $1084\text{ cm}^{-1}$  (Figure 19). Il est donc proposé que l'inclusion soit une calcite.





### 5.1.5. Hinnganite-(Y)

La chimie de l'inclusion décrite dans la section 4.3.11 (silicate d'yttrium, de calcium, de fer et de terres rares) peut correspondre à celle de l'hingganite-(Y), de formule  $(Y, \text{REE}, \text{Ca})_2(\square, \text{Fe}^{2+})\text{Be}_2[\text{SiO}_4]_2(\text{OH})_2$ . En comptant que la formule contient 15 atomes en ignorant le béryllium et l'hydrogène, rapporter les valeurs du Tableau 12 à 15 atomes donne : 1,30 Y, 0,17 Gd, 0,13 Sm, 0,12 Ce, 0,03 La, 0,57 Ca (total Y + REE + Ca : 2,32 atomes), 0,38 Fe (plus 0,22 Mg), 2,67 Si (plus 0,18 Al) et 9,23 O. Les valeurs s'approchent plutôt bien de la formule de l'hingganite-(Y). Il s'agit d'un argument fort en faveur de ce minéral.

Il n'existe pas de spectre de référence pour l'hingganite-(Y) dans la base de données Raman du RRUFF. Les pics caractéristiques isolés au Raman, à 184, (328) (fort élargissement du pic) et 918 ( $\text{cm}^{-1}$ , pic large beaucoup plus important que celui du béryl)  $\text{cm}^{-1}$ , ont donc été comparés au spectre de référence de l'hingganite-(Ce) du RRUFF numéro R060857, pour une excitatrice de 785 nm (Figure 20). Les correspondances sont faibles : dans la référence, il existe bien une bande large à 328  $\text{cm}^{-1}$ . Un pic à 900  $\text{cm}^{-1}$  est proche de celui des données à 918  $\text{cm}^{-1}$  et pourrait peut-être correspondre à un épaulement dans les données. En revanche, le pic large qui domine le spectre de référence, à 1202  $\text{cm}^{-1}$ , n'est pas trouvé dans les données. Cependant, le spectre de référence ne correspondant pas à une hingganite-(Y), et la chimie étant bonne pour déterminer une hingganite-(Y), on restera sur cette dernière hypothèse pour nommer l'inclusion.

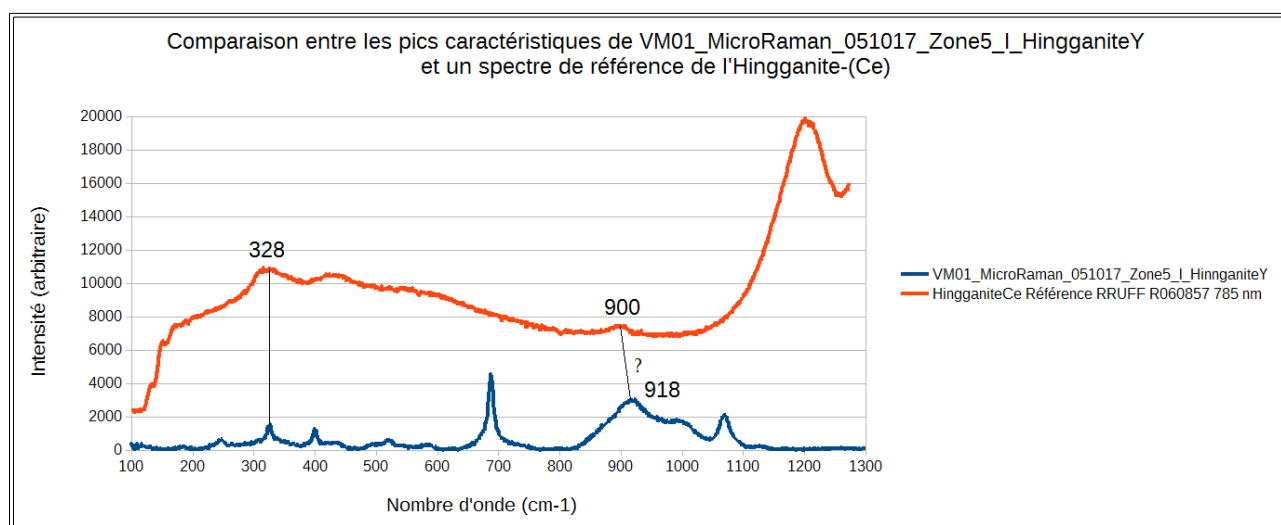


Figure 20: Comparaison entre VM01\_MicroRaman\_021017\_Zone5\_I\_HinnganiteY et un spectre de référence du RRUFF pour l'hingganite-(Ce) pour les pics caractéristiques identifiés. Une seule correspondance peut être établie pour le pic élargi à 328  $\text{cm}^{-1}$ , et il existe une proximité entre la référence et les données pour le pic large de forte intensité à 918  $\text{cm}^{-1}$ . Les spectres restent cependant très éloignés.

### 5.1.6. Indéterminé

La formule minéralogique trouvée la plus proche de la chimie de l'inclusion décrite dans la section 4.3.12 (phosphate-carbonate de cérium et de lanthane) (Tableau 13) est celle de la daqingshanite-(Ce),  $(\text{Sr,Ca,Ba})_3(\text{Ce,Lu})(\text{CO}_3)_{3-x}(\text{PO}_4)(\text{OH,F})_{2x}$ . Cependant, le problème immédiatement posé est que l'inclusion analysée ne présente pas de strontium, de calcium ou de baryum. De plus, le spectre de référence de la daqingshanite-(Ce) du RRUFF numéro R070389, pour une excitatrice à 532 nm, ne montre pas de correspondance avec le pic caractéristique à  $194\text{ cm}^{-1}$  isolé dans les données. Il n'est donc pas possible de conclure sur cette inclusion, qui sera juste décrite comme un phosphate-carbonate de cérium et de lanthane.

## 5.2. Inclusions et contexte gîtologique

Les inclusions décrites dans le cadre de cette étude montrent une chimie riche en terres rares (La, Ce, Gd, Sm) pour l'allanite-(Ce), l'hingganite-(Y) et le phosphate-carbonate de cérium et lanthane. La présence de beaucoup de rutile et de titanite renseigne sur une forte présence de titane. La présence de fluorapatite, du phosphate-carbonate (environ 1,39 % de fluor) et de calcite renseigne également sur la présence de fluor, de groupements phosphate ( $\text{PO}_4$ ) et de groupements carbonate ( $\text{CO}_3$ ). On observe une présence de chrome dans VM01 (0,13 % atomique, proche de la limite de détection), ainsi que dans l'hématite, le clinocllore et le rutile.

Les pegmatites sont riches en éléments incompatibles comme les HFSE (High Field Strength Elements), auxquels appartiennent les terres rares et le titane. Elles sont également riches en éléments volatils, comme  $\text{F}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  et  $\text{PO}_4^{2-}$ . Ces arguments peuvent être utilisés pour emmener l'hypothèse d'une origine pegmatitique des émeraudes de Jharkhand : elles peuvent avoir effectué leur croissance à l'interface entre une pegmatite très différenciée, notamment très riche en terres rares, et une roche ultrabasique (classiquement riche en chrome) (Figure 21). La croissance de l'émeraude à l'interface de la pegmatite et de la roche ultrabasique a donc pu s'accompagner de la cristallisation de nombreux minéraux secondaires qui auront absorbé les terres rares, une partie des volatils, du titane et du chrome, formant une paragenèse minéralogique unique parmi les gisements d'émeraude.

Les roches réactionnelles formées à l'interface de la pegmatite et de la roche ultrabasique se forment souvent selon la section suivante : pegmatite <> phlogopite <> talc-schiste <> roche ultrabasique (Figure 21). Les émeraudes pouvant cristalliser dans le talc-schiste, cela pourrait expliquer la grande proportion de talc dans les échantillons.

Shreeram *et al.* (2014) indiquent que la zone de cisaillement de Singhbhum se caractérise par la présence d'un massif de granite intrusif (magmatisme acide) ainsi que de roches ultrabasiques. Il s'agit donc d'un contexte idéal pour cette hypothèse de genèse du gisement. La zone étant une zone de cisaillement, il est cependant difficile de dire si une pegmatite a intrudé une roche ultrabasique, ou si la tectonique et le métamorphisme ont permis la mise en contact des unités et la mise en place d'une circulation de fluides à l'interface, ultérieurement à la formation des roches.

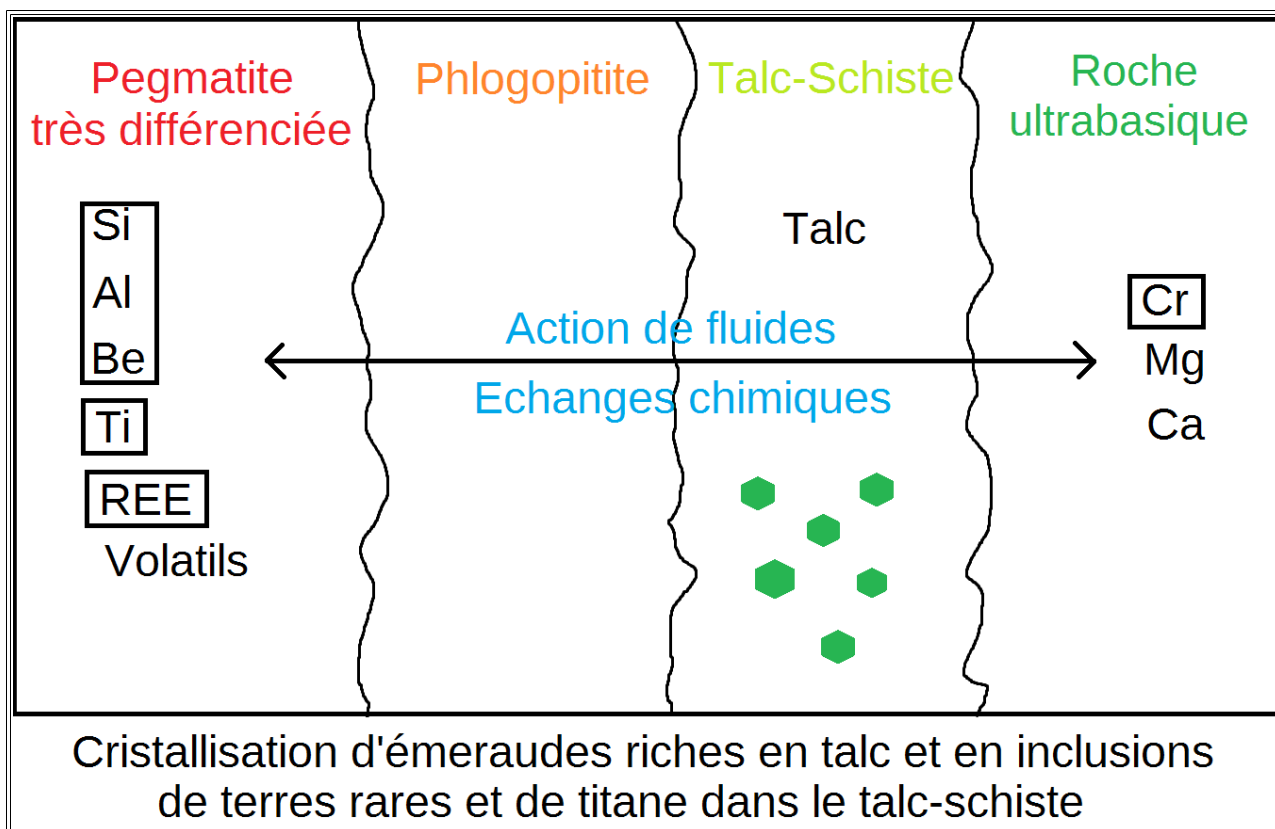


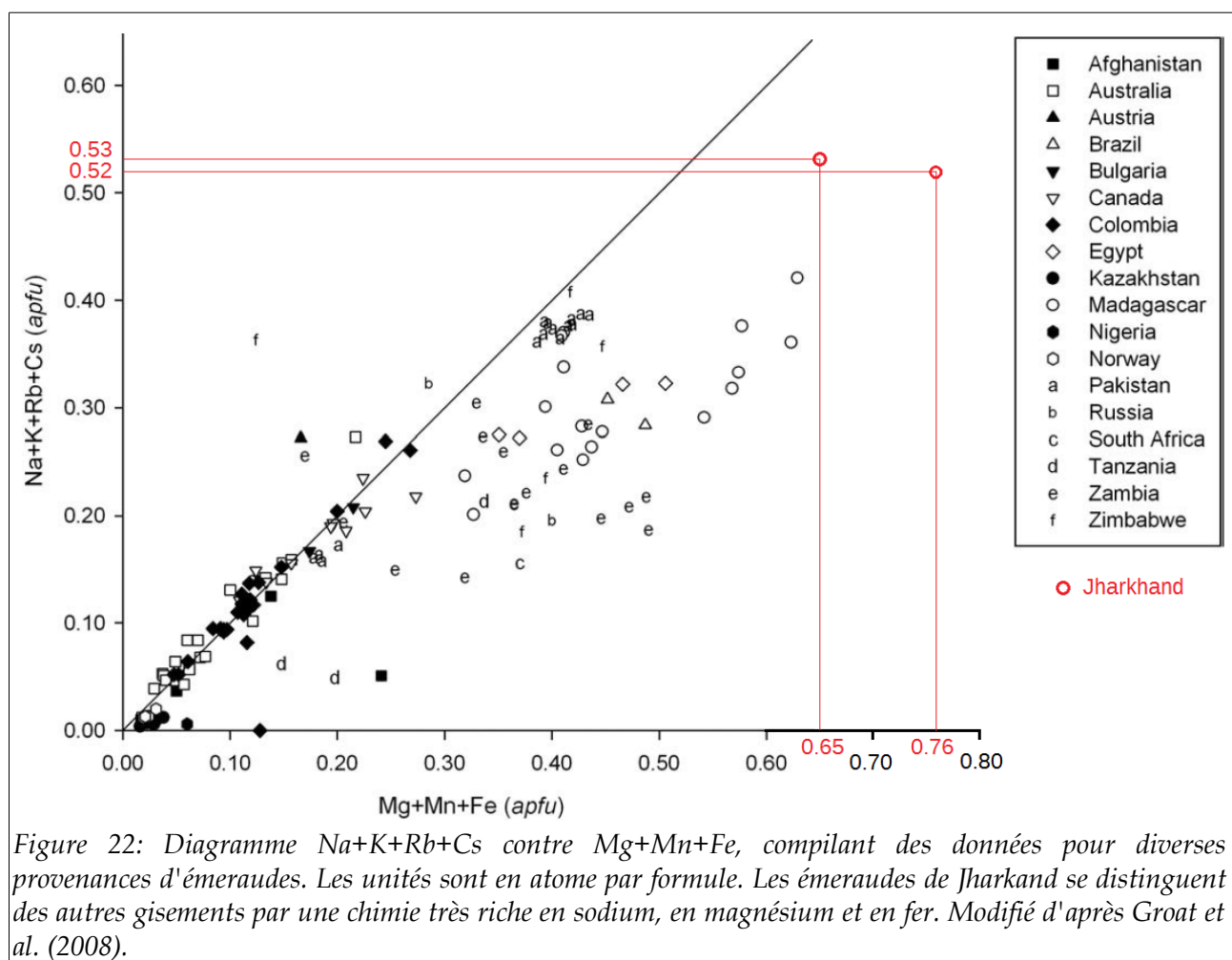
Figure 21: Schéma récapitulatif de la gîtologie possible des émeraudes de Jharkhand, avec les résultats obtenus pour cette étude. La pegmatite et la roche ultrabasique fournissent les éléments nécessaires à la cristallisation de l'émeraude (Be, Si, Al, Cr). La pegmatite, très différenciée, fournit également beaucoup de terres rares, ainsi que du titane et des volatils, qu'on retrouvera dans les inclusions solides. Le talc, présent en grande quantité, provient probablement d'une cristallisation des émeraudes dans le talc-schiste.

### 5.3. Spécificités du gisement de Jharkhand

Le gisement de Jharkhand montre une paragenèse d'inclusions unique parmi les émeraudes, avec notamment la présence caractéristique de minéraux riches en terres rares : allanite-(Ce) très présente, hinnganite-(Y) très présente, et phosphate-carbonate de cérium et de lanthane. Ces minéraux s'accompagnent de minéraux plus classiques : quartz, rutile (très présent), zircon, titanite, fluorapatite, talc, clinocllore, hématite et calcite.

Choudary (2015) renseigne également la présence d'actinolite, de beta-fergusonite, d'épidote, de spinelles ferrières (chromite/magnésite/picotite) et de phenakite, non observés au cours de cette étude. L'allanite-(La) décrite par Choudary semble en réalité être de l'allanite-(Ce), d'après les mesures de chimie effectuées. Les micas observés ne sont ici exprimés qu'au travers du clinocllore, bien que Choudary observe également de l'annite, du phlogopite, de la chamosite et de la biotite. L'absence notable d'inclusions fluides décrite par Choudary est vérifiée dans cette étude.

En compilant les paragenèses de cette étude et de Choudary (2015), on obtient donc un ensemble d'inclusions solides caractéristique du gisement, également caractérisé par son absence notable d'inclusions fluides. De plus, le gisement est très riche en alcalin (sodium), ce qui est cohérent avec la forte présence d'eau de type I et II (Rondeau, 2003) observée par spectroscopie IR, où le massif de l'eau  $H_2O$  atteint l'absorption totale. On peut donc essayer de classer le gisement de Jharkhand selon la teneur en alcalins par rapport aux autres gisements d'émeraude, en le comparant avec la compilation effectuée par Groat *et al.* (2008). En rapportant la teneur en Na, Fe et Mg de VM01 à un total de 26 atomes (en ignorant le béryllium dans la formule minéralogique du béryl), on obtient, pour VM01 : 0,53 Na, 0,46 Mg et 0,19 Fe ; pour VM02 : 0,52 Na, 0,52 Mg et 0,24 Fe. Ce qui donne, pour VM01 : 0,53 Na pour 0,65 (Fe+Mg) ; pour VM02 : 0,52 Na pour 0,76 (Fe+Mg). Ces valeurs, reportées sur le graphique de Groat *et al.* (2008), sont alors à part des autres valeurs de la compilation (Figure 22), ce qui est une autre spécificité du gisement de Jharkhand.



## 6. Conclusion

Le gisement d'émeraude indien de Jharkhand est un gisement unique de par sa paragenèse d'inclusions solides, son absence d'inclusions fluides et sa teneur très haute en sodium, en magnésium et en fer. Il se caractérise par de nombreuses inclusions rares et riches en terres rares, telles que l'allanite-(Ce) et l'hingganite-(Y), très fréquentes dans les échantillons. Il montre une très forte concentration de talc et de rutil. Ces inclusions s'accompagnent également de quartz, zircon, titanite, fluorapatite et clinocllore. Une présence d'hématite et de calcite est observée, ainsi qu'un minéral indéterminé correspondant à un phosphate-carbonate de cérium et de lanthane.

La paragenèse d'inclusions solides oriente vers une gîtologie liée à un contact entre une pegmatite très différenciée, source de béryllium et très riche en terres rares, en titane et en éléments volatils ; et une roche ultrabasique, source de chrome et de magnésium. La présence de talc, typique des talc-schistes créés lors de la réaction entre ces deux réservoirs lors du passage des fluides, oriente vers le talc-schiste comme roche hôte des émeraudes. Cette gîtologie est possible dans le contexte de la zone de cisaillement de Singhbhum, qui abrite des intrusions liées au magmatisme acide et des roches ultrabasiques.

La très grande concentration d'inclusions solides fait que les échantillons issus de ce gisement sont très complets à étudier : un échantillon peut être porteur à lui seul d'une paragenèse très complexe et diversifiée. En conséquence, une étude plus approfondie, menée sur plus de temps et d'échantillons, permettrait probablement de continuer d'enrichir la liste des inclusions solides associées à ce gisement. Cela permettrait de mettre en évidence des pistes supplémentaires pour mieux évaluer la genèse du gisement.

De plus, l'étude n'ayant pas permis d'identifier le phosphate-carbonate de cérium et de lanthane, il pourrait être intéressant de continuer sa caractérisation, et de chercher si d'autres occurrences de ce minéral apparaissent dans les émeraudes du gisement. Avec la richesse chimique et minéralogique qu'offrent les échantillons, il reste possible qu'il s'agisse d'un minéral encore non décrit.

## 7. Bibliographie

- Cassedane J., Le Cleac'h J-M., Lebrun P. (1997) Béryls, bénitoïte, bazzite, axinites et cordiérites : histoire – minéralogie – gemmologie – gisements. Minéraux & Fossiles, Hors-Série n°5, CEDIM, Paris, 99 pages.
- Choudary G. (2015) Emeralds from Jharkhand, India: An update. Dans « 34<sup>th</sup> IGC 2015, Poster Sessions », Vilnius, Lituanie, p. 139-142.
- Della Ventura G., Radica F., Bellatreccia F., Cavallo A., Cinque G., Tortora L., Behrens H. (2015) The diffusion of CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O in a synthetic sector-zoned beryl: a multi-analytical study. Chemical Geology (non publié), 29 pages.
- Groat L.A., Giuliani G., Marshall D.D., Turner D. (2008) Emerald deposits and occurrences: A review. Ore Geology Reviews, Vol. 34, p. 87-112.
- Rondeau B. (2003) Matériaux Gemmes de Référence du Muséum National D'Histoire Naturelle: exemples de valorisation scientifique d'une collection de minéralogie et gemmologie. Mémoire de thèse de doctorat, École doctorale Sciences de la Nature et de l'Homme. Évolution et écologie, Paris, France, p.206-220.
- Shreeram S.S., Sahendra S., Jyoti S.S. (2014) Genesis of Emerald Occurrences and Their Exploration Implications within Singhbhum Shear Zone, Eastern Indian Craton. Acta Geologica Sinica (English Edition), Vol. 88, p. 1481-1482.



## 8. Annexe : fiches de travail

### 8.1. VM01

#### Gemmologie classique

Espèce : Béryl

Variété : Émeraude

Provenance géologique : Jharkhand

Propriétaire : GGTL Laboratories

Date d'entrée : Automne 2016

Poids (ct) : 0,68

Dimensions (mm) : 5,4 x 5,1 x 2,9

Taille : Brut, 2 faces prismatiques polies

Couleur : Vert (pas de distribution de couleur)

Transparence : Transparent

Particularités : Très inclus

Indice de réfraction : 1,590 / 1,600

Biréfringence : 0,010

Signe optique : U<sup>-</sup>

Pléochroïsme : Vert / Vert-Bleu

Comportement au polariscope : Rétablit la lumière au 1/4 de tour

Densité : 2,654

Réaction UVL : Inerte

Réaction UVC : Inerte

### Spectroscopie Raman de l'émeraude

Nom : VM01\_MicroRaman\_051017\_RéférenceBéryl

Appareil : Raman dispersif Labram HR

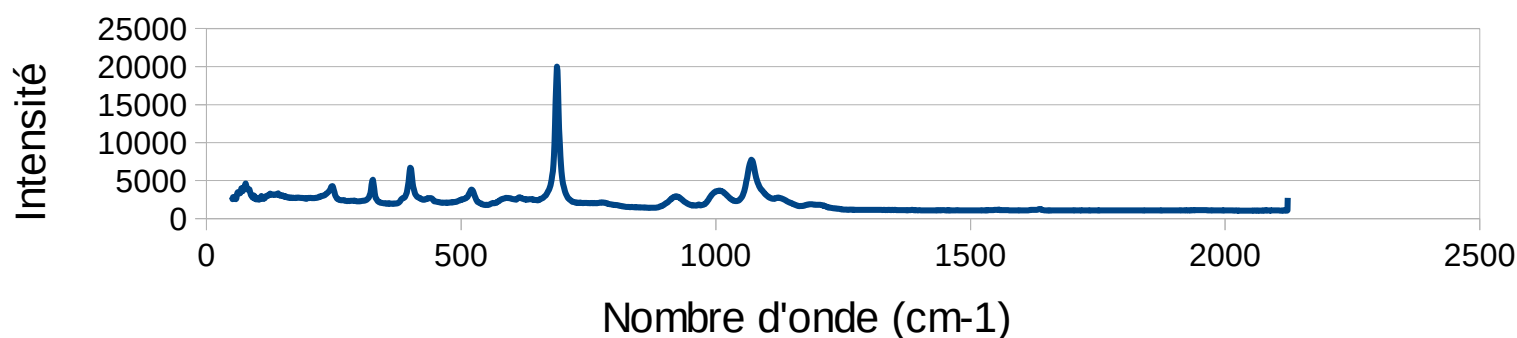
Date : 05/10/17

Plage d'analyse : 50-2120  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 1  $\text{cm}^{-1}$

Pics identifiés : 78, 123, 247, 326, 400, 439, 521, 590, 614, 688, 781, 923, 1007, 1070, 1123, 1195, 1556, 1623, 1635, 1956  $\text{cm}^{-1}$

#### VM01\_MicroRaman\_051017\_RéférenceBéryl



Nom : VM01\_MicroRaman\_241017\_RéférenceBéryl

Appareil : Raman dispersif Labram HR

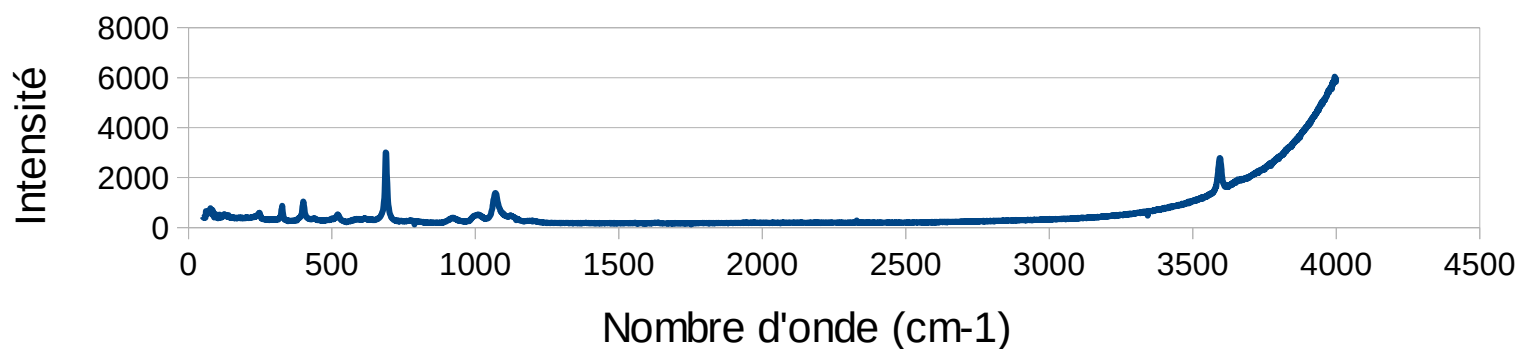
Date : 24/10/17

Plage d'analyse : 50-4000  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 1  $\text{cm}^{-1}$

Pics identifiés : 77, 248, 327, 400, 438, 521, 588, 615, 688, 924, 1007, 1070, 1124, 1199, 1635, 3594  $\text{cm}^{-1}$

#### VM01\_MicroRaman\_241017\_RéférenceBéryl



Nom : VM01\_MicroRaman\_251017\_RéférenceBéryl

Appareil : Raman dispersif Labram HR

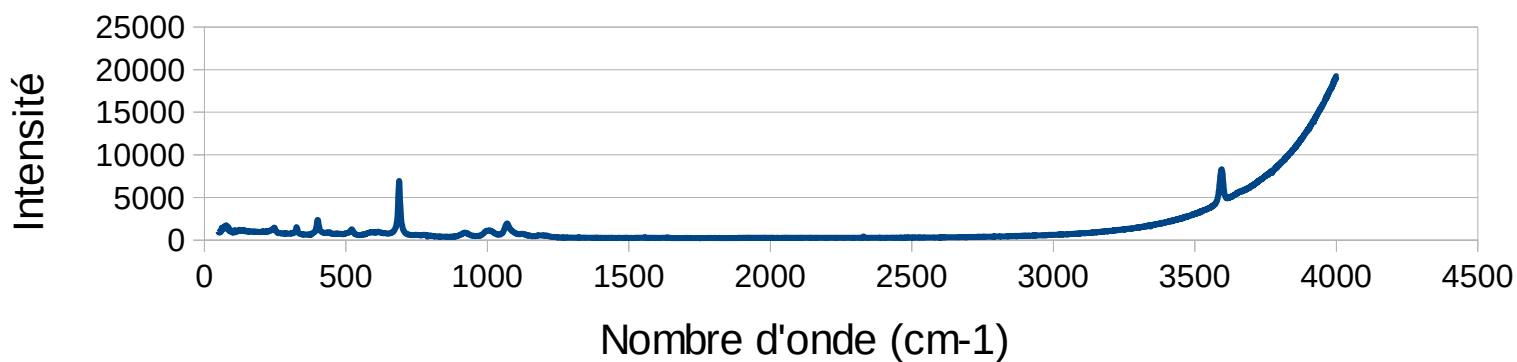
Date : 25/10/17

Plage d'analyse : 50-4000  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 1  $\text{cm}^{-1}$

Pics identifiés : 79, 248, 325, 401, 443, 521, 591, 614, 688, 778, 921, 1005, 1070, 1124, 1194, 3595  $\text{cm}^{-1}$

### VM01\_MicroRaman\_251017\_RéférenceBéryl



Nom : VM01\_MicroRaman\_261017\_RéférenceBéryl

Appareil : Raman dispersif Labram HR

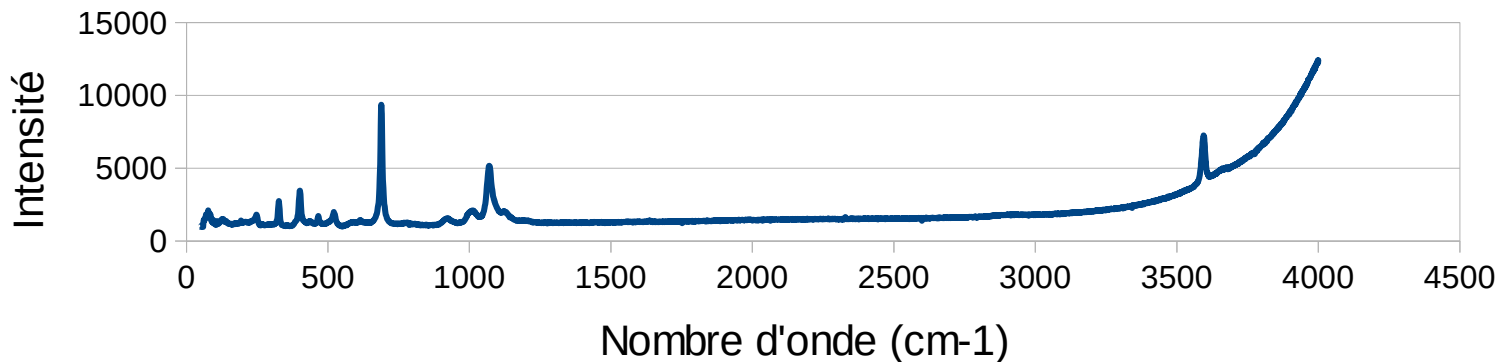
Date : 26/10/17

Plage d'analyse : 50-4000  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 1  $\text{cm}^{-1}$

Pics identifiés : 78, 130, 248, 327, 400, 466, 521, 589, 613, 689, 923, 1010, 1071, 1124, 5595  $\text{cm}^{-1}$

### VM01\_MicroRaman\_261017\_RéférenceBéryl



### Spectroscopie IR et EDS de l'émeraude

Nom : VM01\_TransmissionIR\_231116

Appareil : FTIR Bruker Vertex 70

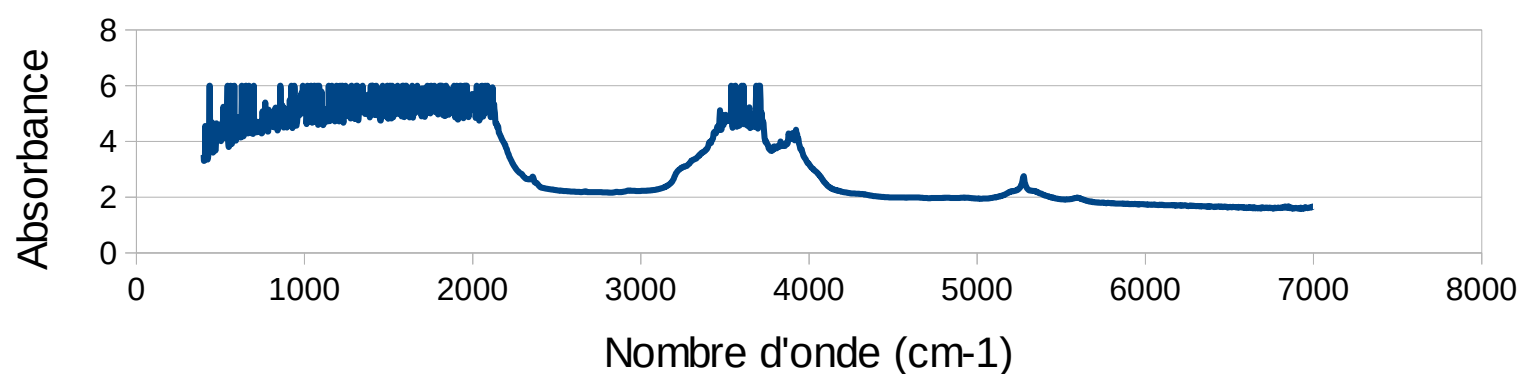
Date : 23/11/16

Plage d'analyse : 7000-400  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 4  $\text{cm}^{-1}$

Pics identifiés : 5595, 5335, 5277, 5204, 4309, 4042, massif 3600, massif 3900, 3223, 2672, 2378, 2359, 2291  $\text{cm}^{-1}$

### VM01\_TransmissionIR\_231116



Nom : VM01\_EDSMEB\_031017\_RéférenceBéryl

Appareil : JEOL 5800LV

Date : 03/10/17

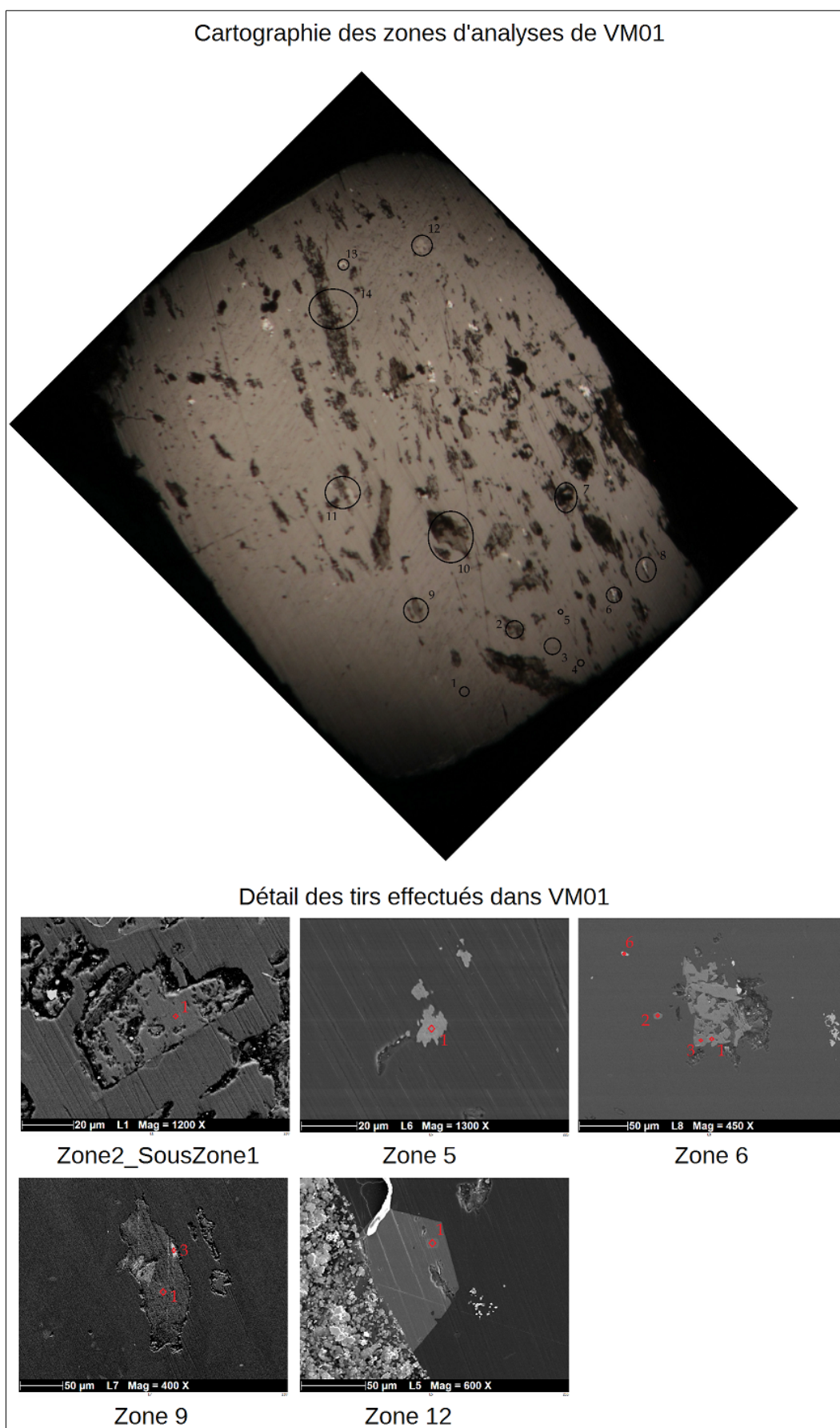
Tension d'accélération (kV) : 15

Courant (nA) : 0,5

Quantification EDS :

| VM01_EDSMEB_031017_RéférenceBéryl |       |      |      |      |      |      |      |               |
|-----------------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|---------------|
| Chimie (a%)                       |       |      |      |      |      |      |      | Bouclage (w%) |
| O                                 | Si    | Al   | Na   | Mg   | Fe   | Cr   | Cl   |               |
| 60,71                             | 28,27 | 6,22 | 2,05 | 1,78 | 0,73 | 0,13 | 0,11 | 79,85         |

## Cartes pour l'emplacement des inclusions



### Analyses des inclusions : spectroscopie Raman et EDS

#### Zone 2, Sous-Zone 1, Tir I, Quartz :

Nom : VM01\_EDSMEB\_031017\_Zone2\_SousZone1\_I\_Quartz

Appareil : JEOL 5800LV

Date : 03/10/17

Tension d'accélération (kV) : 15

Courant (nA) : 0,5

Quantification EDS :

| VM01_EDSMEB_031017_Zone2_SousZone1_I_Quartz |       |      |               |
|---------------------------------------------|-------|------|---------------|
| Chimie (a%)                                 |       |      | Bouclage (w%) |
| O                                           | Si    | Al   |               |
| 56,36                                       | 43,03 | 0,23 | 83,93         |

#### Zone 5, Tir I, HingganiteY :

Nom : VM01\_MicroRaman\_051017\_Zone5\_I\_HinnganiteY

Appareil : Raman dispersif Labram HR

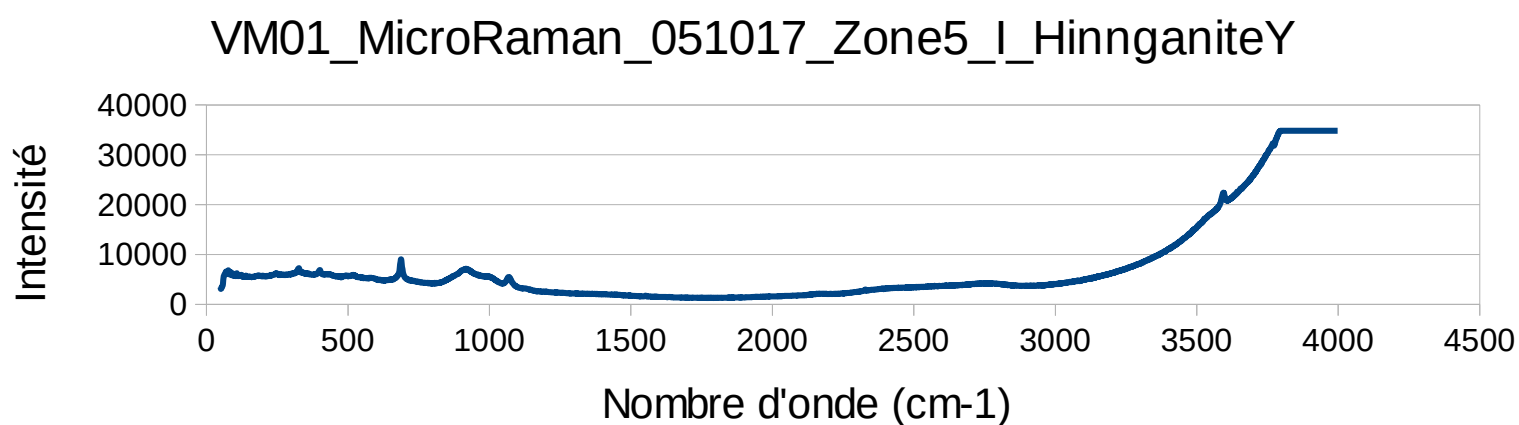
Date : 05/10/17

Plage d'analyse : 50-4000  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 1  $\text{cm}^{-1}$

Remarques : Signal dominé par celui de l'émeraude, voir VM01\_MicroRaman\_051017\_RéférenceBéryl

Pics caractéristiques identifiés : 184, 328, 918  $\text{cm}^{-1}$





Nom : VM01\_EDSMEB\_261017\_Zone5\_I\_HingganiteY

Appareil : JEOL 5800LV

Date : 26/10/17

Tension d'accélération (kV) : 15

Courant (nA) : 0,5

Quantification EDS :

| VM01_EDSMEB_261017_Zone5_I_HingganiteY |       |      |      |      |      |      |      |      |      |     | Bouclage (w%) |
|----------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|---------------|
| Chimie (a%)                            |       |      |      |      |      |      |      |      |      |     |               |
| O                                      | Si    | Y    | Ca   | Fe   | Mg   | Al   | Gd   | Sm   | Ce   | La  |               |
| 61,56                                  | 17,79 | 8,67 | 3,77 | 2,56 | 1,48 | 1,18 | 1,11 | 0,86 | 0,82 | 0,2 | 80,91         |

Zone 6, Tir I, Rutile :

Nom : VM01\_MicroRaman\_051017\_Zone6\_I\_Rutile

Appareil : Raman dispersif Labram HR

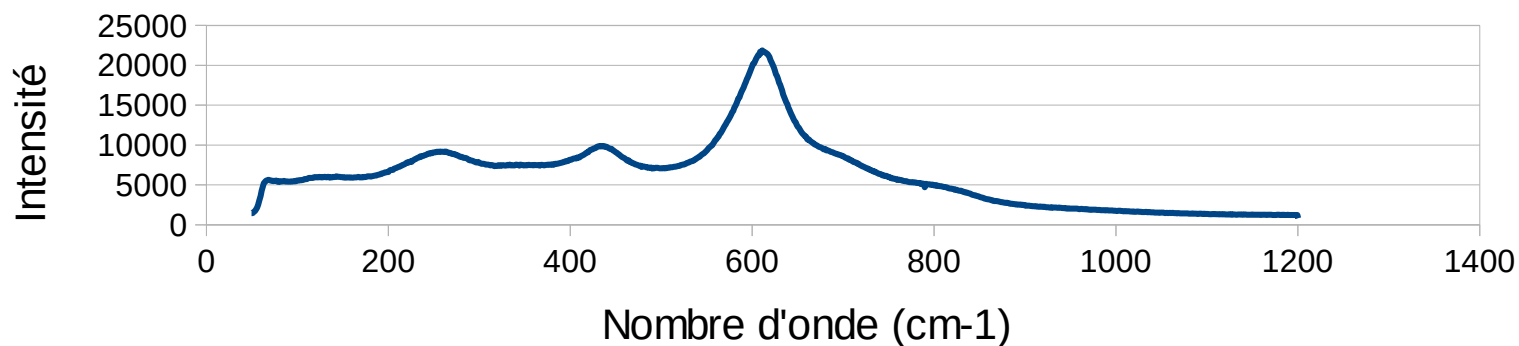
Date : 05/10/17

Plage d'analyse : 50-1200  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 1  $\text{cm}^{-1}$

Pics identifiés : 125, 257, 434, 499, 612, 701, 804, 1000  $\text{cm}^{-1}$

VM01\_MicroRaman\_051017\_Zone6\_I\_Rutile



Nom : VM01\_EDSMEB\_031017\_Zone6\_I\_Rutile

Appareil : JEOL 5800LV

Date : 03/10/17

Tension d'accélération (kV) : 15

Courant (nA) : 0,5

Quantification EDS :

| VM01_MicroRaman_051017_Zone6_I_Rutile |       |      |      |      |      |               |
|---------------------------------------|-------|------|------|------|------|---------------|
| Chimie (a%)                           |       |      |      |      |      | Bouclage (w%) |
| O                                     | Ti    | Si   | Cr   | Fe   | Nb   |               |
| 60,71                                 | 38,13 | 0,55 | 0,27 | 0,16 | 0,11 | 87,51         |

Zone 6, Tir II, Fluorapatite :

Nom : VM01\_MicroRaman\_051017\_Zone6\_II\_Fluorapatite

Appareil : Raman dispersif Labram HR

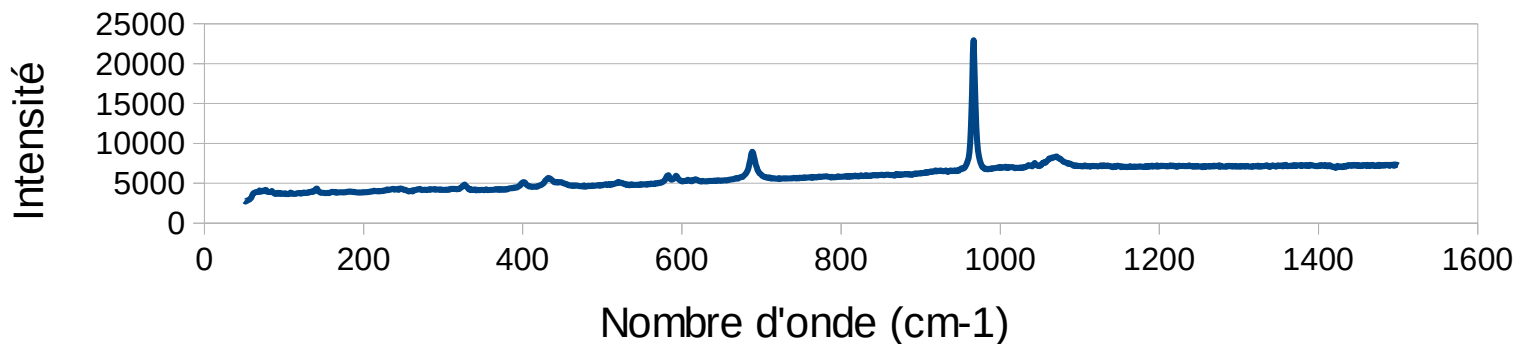
Date : 05/10/17

Plage d'analyse : 50-1500  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 1  $\text{cm}^{-1}$

Pics identifiés : 141, 246, 327, 400, 433, 449, 522, 584, 593, 607, 617, 688, 919, 967, 1036, 1043, 1071  $\text{cm}^{-1}$

### VM01\_MicroRaman\_051017\_Zone6\_II\_Fluorapatite



Nom : VM01\_EDSMEB\_031017\_Zone6\_II\_Fluorapatite

Appareil : JEOL 5800LV

Date : 03/10/17

Tension d'accélération (kV) : 15

Courant (nA) : 0,5

Quantification EDS :

| VM01_EDSMEB_031017_Zone6_II_Fluorapatite |       |       |      |      |               |
|------------------------------------------|-------|-------|------|------|---------------|
| Chimie (a%)                              |       |       |      |      | Bouclage (w%) |
| O                                        | Ca    | P     | F    | Si   |               |
| 45,98                                    | 28,68 | 16,67 | 8,28 | 0,39 | 88,39         |

Zone 6, Tir III, Titanite :

Nom : VM01\_MicroRaman\_051017\_Zone6\_III\_Titanite

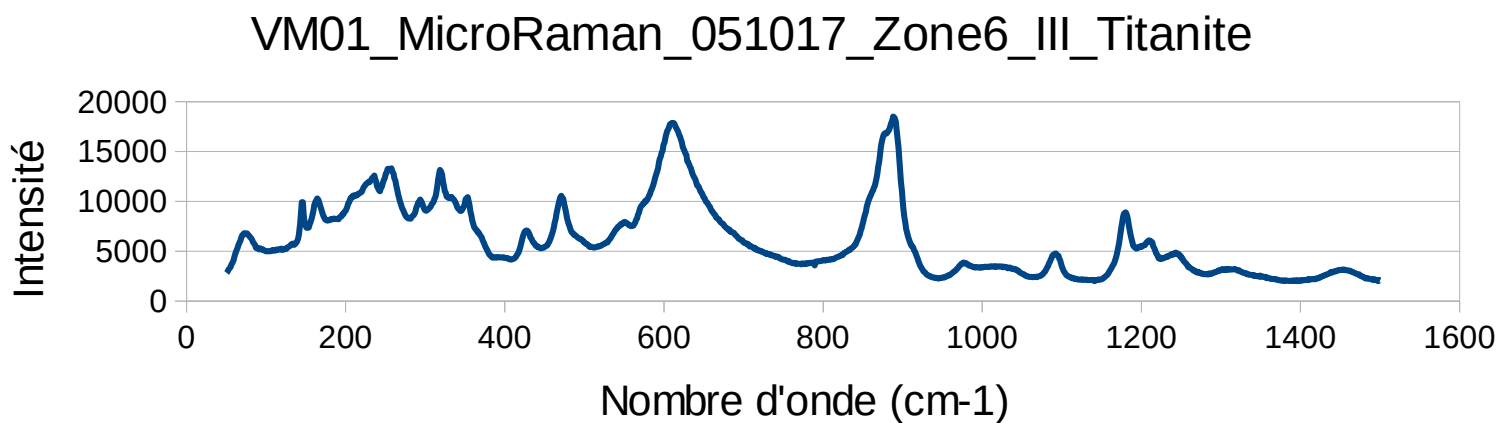
Appareil : Raman dispersif Labram HR

Date : 05/10/17

Plage d'analyse : 50-1500  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 1  $\text{cm}^{-1}$

Pics identifiés : 73, 146, 164, 236, 209, 225, 256, 295, 319, 333, 353, 408, 427, 471, 550, 611, 574, 769, 859, 879, 889, 912, 945, 976, 1026, 1092, 1180, 1210, 1243, 1312, 1453  $\text{cm}^{-1}$



Nom : VM01\_EDSMEB\_031017\_Zone6\_III\_Titanite

Appareil : JEOL 5800LV

Date : 03/10/17

Tension d'accélération (kV) : 15

Courant (nA) : 0,5

Quantification EDS :

| VM01_EDSMEB_031017_Zone6_III_Titanite |      |       |    |      |               |
|---------------------------------------|------|-------|----|------|---------------|
| Chimie (a%)                           |      |       |    |      | Bouclage (w%) |
| O                                     | Si   | Ca    | Ti | Al   |               |
| 57,69                                 | 14,7 | 13,88 | 13 | 0,73 | 87,61         |

Zone 6, Tir VI, Zircon :

Nom : VM01\_MicroRaman\_051017\_Zone6\_VI\_Zircon

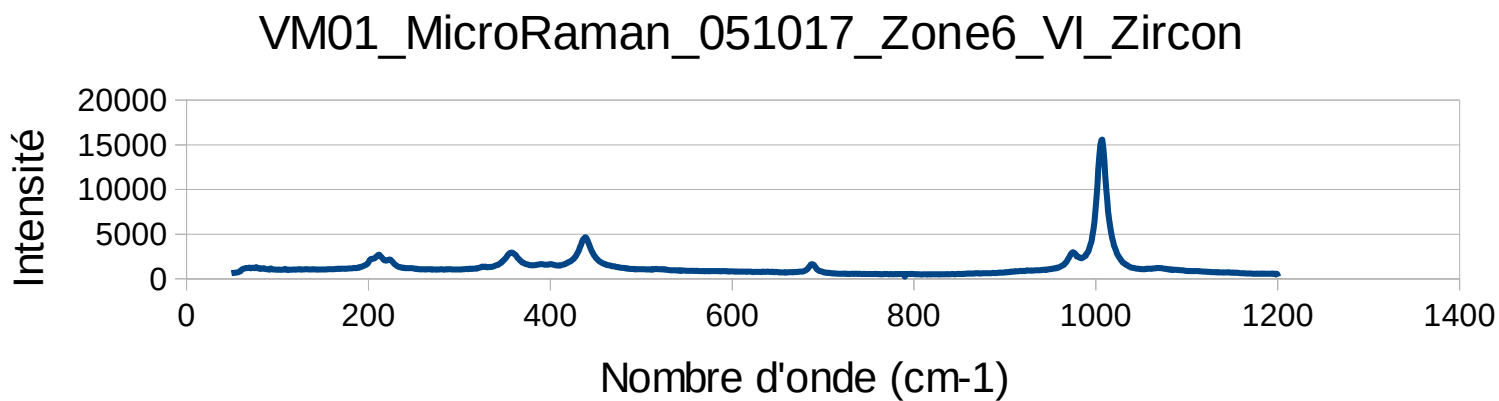
Appareil : Raman dispersif Labram HR

Date : 05/10/17

Plage d'analyse : 50-1200  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 1  $\text{cm}^{-1}$

Pics identifiés : 204, 212, 224, 327, 358, 391, 400, 439, 688, 975, 1007, 1071  $\text{cm}^{-1}$



Zone 9, Tir I, Talc :

Nom : VM01\_MicroRaman\_241017\_Zone9\_I\_Talc

Appareil : Raman dispersif Labram HR

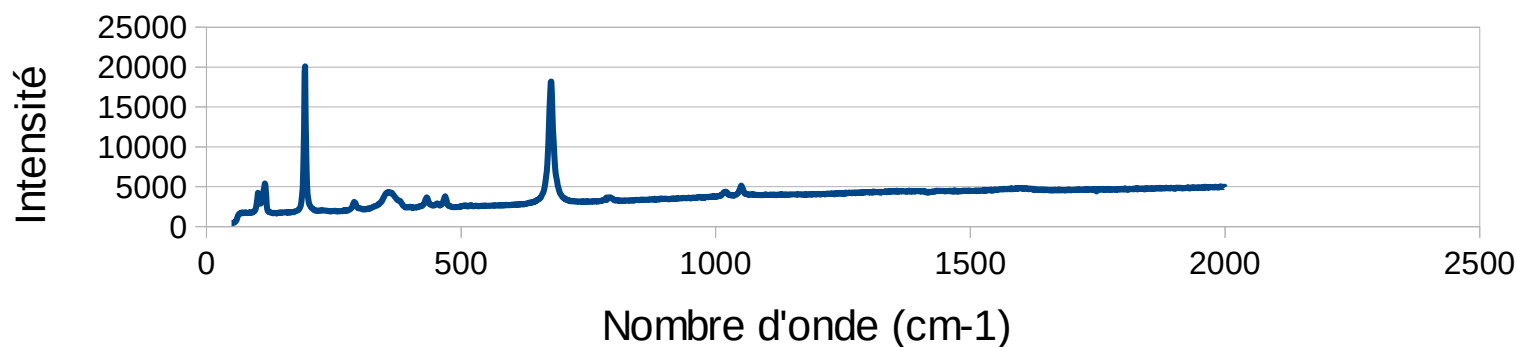
Date : 24/10/17

Plage d'analyse : 50-2000  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 1  $\text{cm}^{-1}$

Pics identifiés : 100, 115, 194, 229, 291, 358, 378, 432, 452, 469, 677, 790, 1010, 1050, 1356, 1595  $\text{cm}^{-1}$

VM01\_MicroRaman\_241017\_Zone9\_I\_Talc



Nom : VM01\_EDSMEB\_261017\_Zone9\_I\_Talc

Appareil : JEOL 5800LV

Date : 26/10/17

Tension d'accélération (kV) : 15

Courant (nA) : 0,5

Quantification EDS :

| VM01_EDSMEB_261017_Zone9_I_Talc |       |       |      |      |               |
|---------------------------------|-------|-------|------|------|---------------|
| Chimie (a%)                     |       |       |      |      | Bouclage (w%) |
| O                               | Si    | Mg    | Fe   | Al   |               |
| 52,75                           | 27,43 | 17,07 | 1,64 | 0,55 | 85,17         |

Zone 9, Tir III, Indéterminé :

Nom : VM01\_MicroRaman\_261017\_Zone9\_III\_Indéterminé

Appareil : Raman dispersif Labram HR

Date : 26/10/17

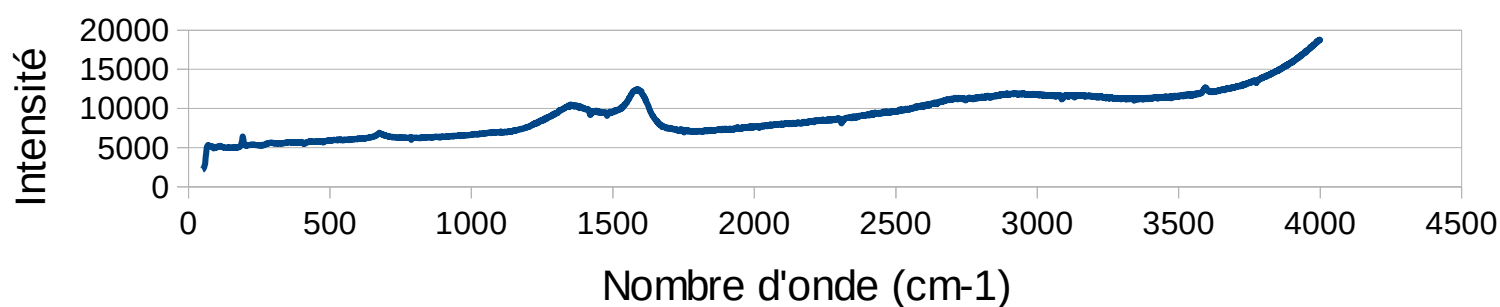
Plage d'analyse : 50-4000  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 1  $\text{cm}^{-1}$

Remarque : Bandes à 1358 et 1588  $\text{cm}^{-1}$  → Artefacts probables (voir VM02\_MicroRaman\_261017\_Zone11\_II\_PhosphateCarbonateCeLa) ; signal influencé par le talc (192, 677  $\text{cm}^{-1}$ )

Pics identifiés : 113, 192, 290, 676, 1358, 1588, 2711, 2915, 3596  $\text{cm}^{-1}$

VM01\_MicroRaman\_261017\_Zone9\_III\_Indéterminé



Zone 12, Tir I, AllaniteCe :

Nom : VM01\_MicroRaman\_251017\_Zone12\_I\_AllaniteCe

Appareil : Raman dispersif Labram HR

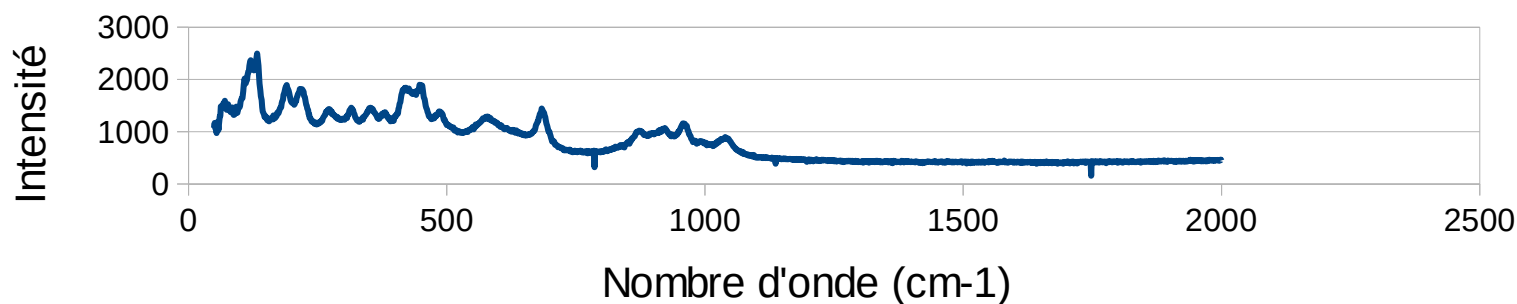
Date : 25/10/17

Plage d'analyse : 50-2000  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 1  $\text{cm}^{-1}$

Pics identifiés : 70, 121, 133, 190, 219, 249, 273, 316, 353, 381, 422, 450, 488, 579, 685, 873, 921, 958, 1039, 1758  $\text{cm}^{-1}$

VM01\_MicroRaman\_251017\_Zone12\_I\_AllaniteCe



Nom : VM01\_EDSMEB\_261017\_Zone12\_I\_AllaniteCe

Appareil : JEOL 5800LV

Date : 26/10/17

Tension d'accélération (kV) : 15

Courant (nA) : 0,5

Quantification EDS :

| VM01_EDSMEB_261017_Zone12_I_AllaniteCe |       |     |      |      |      |      |               |
|----------------------------------------|-------|-----|------|------|------|------|---------------|
| Chimie (a%)                            |       |     |      |      |      |      | Bouclage (w%) |
| O                                      | Si    | Al  | Fe   | Ca   | Ce   | La   |               |
| 58,19                                  | 18,74 | 8,5 | 6,24 | 6,08 | 1,93 | 0,32 | 71,84         |

Zircon, emplacement non indexé :

Nom : VM01\_EDSMEB\_031017\_Zircon

Appareil : JEOL 5800LV

Date : 03/10/17

Tension d'accélération (kV) : 15

Courant (nA) : 0,5

Quantification EDS :

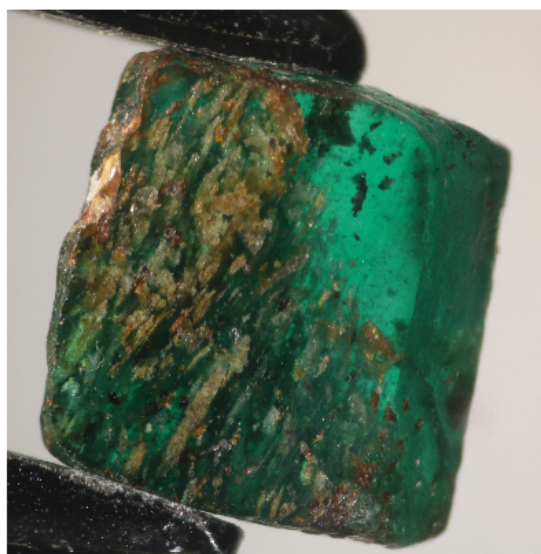
| VM01_EDSMEB_031017_Zircon |       |       |               |
|---------------------------|-------|-------|---------------|
| Chimie (a%)               |       |       | Bouclage (w%) |
| O                         | Zr    | Si    |               |
| 56,3                      | 21,97 | 21,83 | 86,27         |



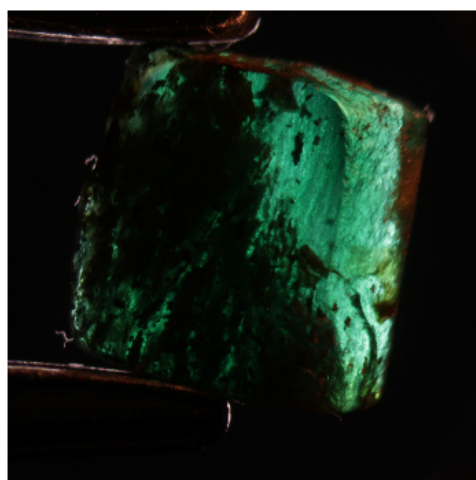
Photographies



VM01



VM01 - Paysage  
d'inclusions



VM01  
Lumière transmise

## 8.2. VM02

### Gemmologie classique

Espèce : Béryl

Variété : Émeraude

Provenance géologique : Jharkhand

Propriétaire : GGTL Laboratories

Date d'entrée : Automne 2016

Poids (ct) : 0,96

Dimensions (mm) : 5,9 x 4,4 x 3,9

Taille : Brut, 1 section polie perpendiculaire aux faces prismatiques

Couleur : Vert (pas de distribution de couleur)

Transparence : Transparent

Particularités : Très inclus (nuit à la transparence)

Indice de réfraction : 1,591 / 1,600

Biréfringence : 0,009

Signe optique : U<sup>-</sup>

Pléochroïsme : Vert / Vert-Bleu (faible)

Comportement au polariscope : Rétablit la lumière au 1/4 de tour

Densité : 2,743

Réaction UVL : Inerte

Réaction UVC : Inerte

### Spectroscopie Raman, spectroscopie IR et EDS de l'émeraude

Nom : VM02\_MicroRaman\_261017\_RéférenceBéryl

Appareil : Raman dispersif Labram HR

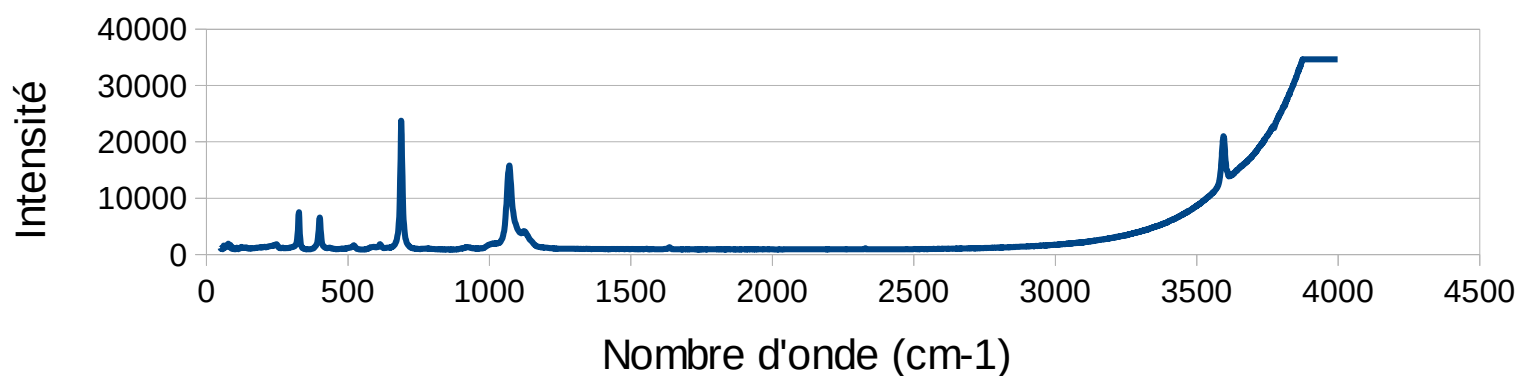
Date : 26/10/17

Plage d'analyse : 50-4000  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 1  $\text{cm}^{-1}$

Pics identifiés : 248, 326, 436, 520, 591, 614, 688, 925, 1008, 1071, 1124, 1639, 3595, 3608  $\text{cm}^{-1}$

#### VM02\_MicroRaman\_261017\_RéférenceBéryl



Nom : VM02\_TransmissionIR\_231116

Appareil : FTIR Bruker Vertex 70

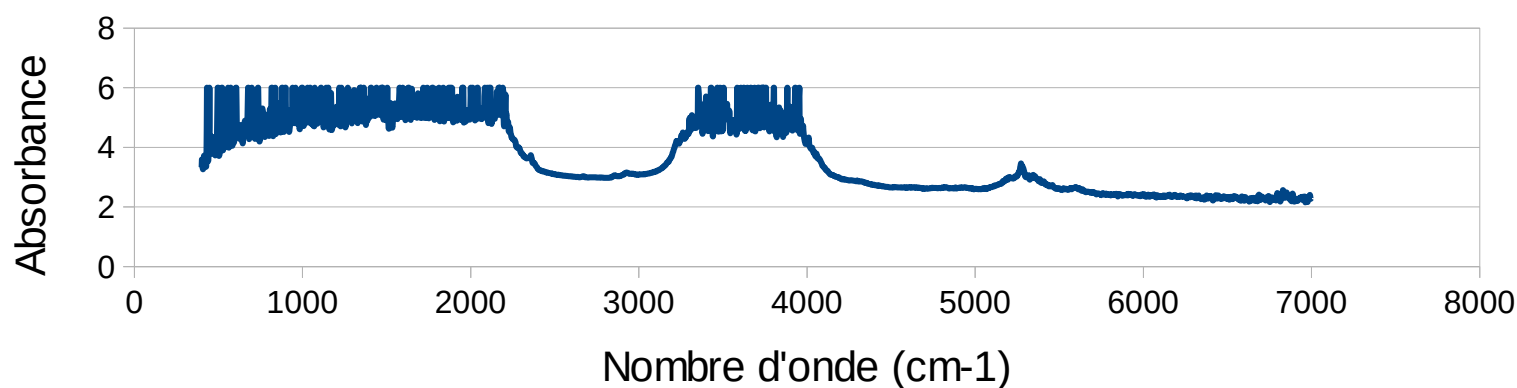
Date : 23/11/16

Plage d'analyse : 7000-400  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 4  $\text{cm}^{-1}$

Pics identifiés : 5597, 5345, 5273, 5203, massif 4000-3200, 2670, 2376, 2356  $\text{cm}^{-1}$

#### VM02\_TransmissionIR\_231116



Nom : VM02\_EDSMEB\_261017\_RéférenceBéryl

Appareil : JEOL 5800LV

Date : 26/10/17

Tension d'accélération (kV) : 15

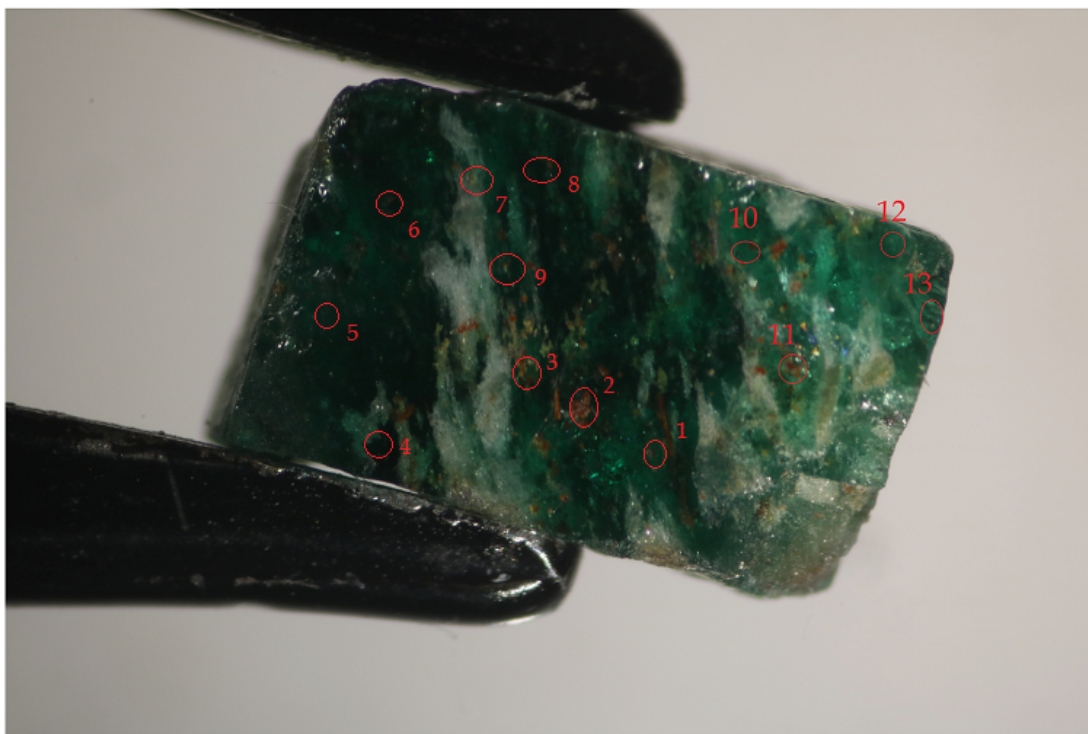
Courant (nA) : 0,5

Quantification EDS :

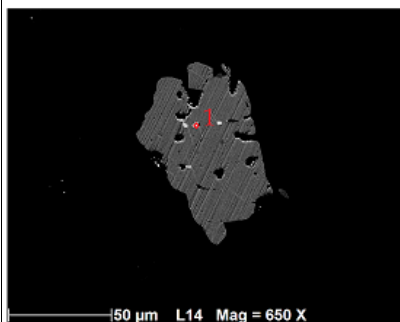
| VM02_EDSMEB_261017_RéférenceBéryl |       |      |      |      |      |     |               |
|-----------------------------------|-------|------|------|------|------|-----|---------------|
| Chimie (a%)                       |       |      |      |      |      |     | Bouclage (w%) |
| O                                 | Si    | Al   | Na   | Mg   | Fe   | Cr  |               |
| 51,54                             | 36,07 | 7,38 | 1,99 | 1,99 | 0,94 | <LD | 69,12         |

### Cartes pour l'emplacement des inclusions

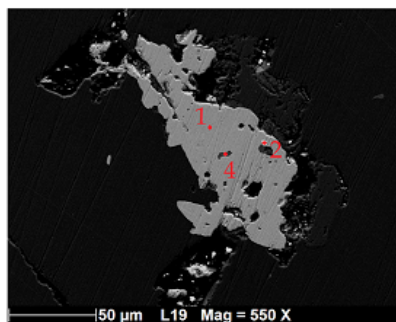
Cartographie des zones d'analyse de VM02



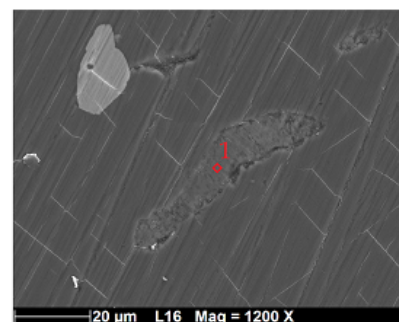
Détails des tirs effectués dans VM02



Zone 10



Zone 11



Zone 13

### Analyses des inclusions : spectroscopie Raman et EDS

#### Zone 10, Tir I, Hématite :

Nom : VM02\_EDSMEB\_261017\_Zone10\_I\_Hématite

Appareil : JEOL 5800LV

Date : 26/10/17

Tension d'accélération (kV) : 15

Courant (nA) : 0,5

Quantification EDS :

| VM02_EDSMEB_261017_Zone10_I_Hématite |       |      |      |               |
|--------------------------------------|-------|------|------|---------------|
| Chimie(a%)                           |       |      |      | Bouclage (w%) |
| Fe                                   | O     | Ti   | Cr   |               |
| 50,09                                | 41,87 | 5,58 | 0,82 | 83,4          |

#### Zone 11, Tir I, Rutile :

Nom : VM02\_MicroRaman\_261017\_Zone11\_I\_RéférenceRutile

Appareil : Raman dispersif Labram HR

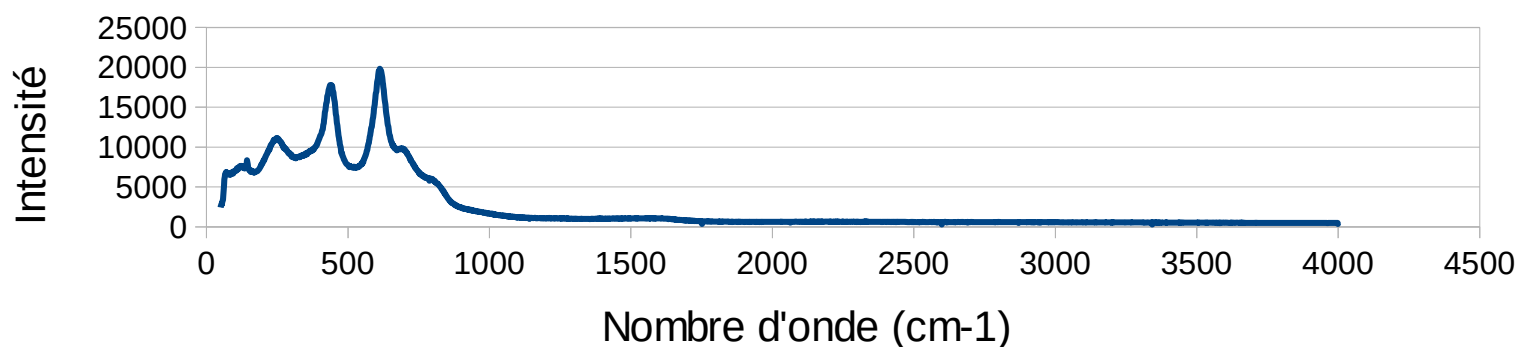
Date : 26/10/17

Plage d'analyse : 50-4000  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 1  $\text{cm}^{-1}$

Pics identifiés : 123, 144, 250, 440, 613, 698, 808, 1596  $\text{cm}^{-1}$

### VM02\_MicroRaman\_261017\_Zone11\_I\_RéférenceRutile



Zone 10, Tir II, PhosphateCarbonateCeLa :

Nom : VM02\_MicroRaman\_261017\_Zone11\_II\_PhosphateCarbonateCeLa

Appareil : Raman dispersif Labram HR

Date : 26/10/17

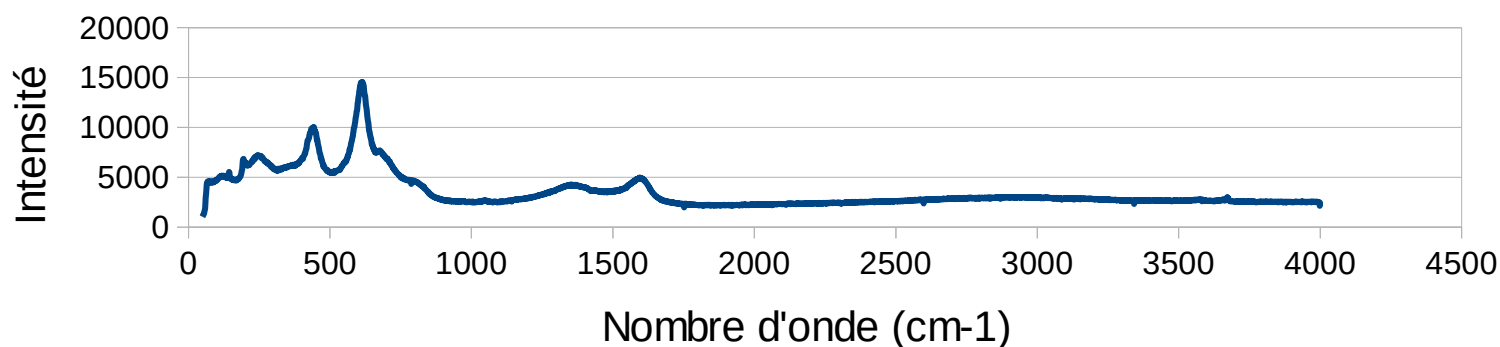
Plage d'analyse : 50-4000  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 1  $\text{cm}^{-1}$

Remarques : Signal dominé par celui du rutile, voir VM02\_MicroRaman\_261017\_Zone11\_I\_RéférenceRutile ; bandes à 1355 et 1599  $\text{cm}^{-1}$  → Artefacts probables, voir VM01\_MicroRaman\_261017\_Zone9\_III\_Indéterminé

Pics caractéristiques identifiés : 194  $\text{cm}^{-1}$

## VM02\_MicroRaman\_261017\_Zone11\_II\_PhosphateCarbonateCeLa



Nom : VM02\_EDSMEB\_261017\_Zone11\_II\_PhosphateCarbonateCeLa

Appareil : JEOL 5800LV

Date : 26/10/17

Tension d'accélération (kV) : 15

Courant (nA) : 0,5

Quantification EDS :

| VM02_EDSMEB_261017_Zone11_II_PhosphateCarbonateCeLa |       |      |      |      |      |      |               |
|-----------------------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|---------------|
| Chimie (a%)                                         |       |      |      |      |      |      | Bouclage (w%) |
| C                                                   | O     | P    | Ce   | La   | Ti   | F    |               |
| 63,04                                               | 20,69 | 6,84 | 4,07 | 2,31 | 1,45 | 1,39 | 115,99        |

Zone 10, Tir IV, Calcite :

Nom : VM02\_MicroRaman\_261017\_Zone11\_IV\_Calcite

Appareil : Raman dispersif Labram HR

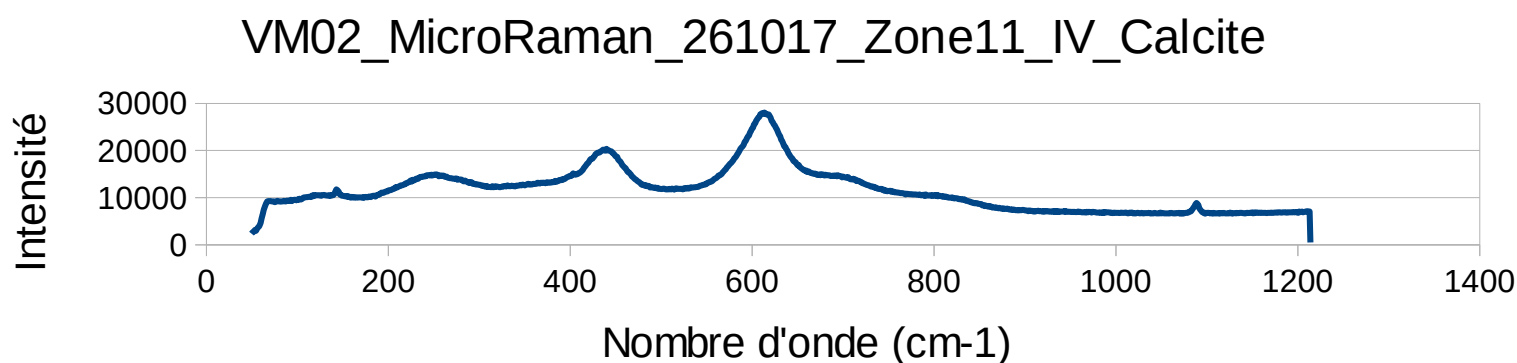
Date : 26/10/17

Plage d'analyse : 50-1200  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 1  $\text{cm}^{-1}$

Remarques : Signal dominé par celui du rutile, voir VM02\_MicroRaman\_261017\_Zone11\_I\_RéférenceRutile

Pics caractéristiques identifiés : 1084  $\text{cm}^{-1}$



Zone 13, Tir I, Clinochlore :

Nom : VM02\_MicroRaman\_261017\_Zone13\_I\_Clinochlore

Appareil : Raman dispersif Labram HR

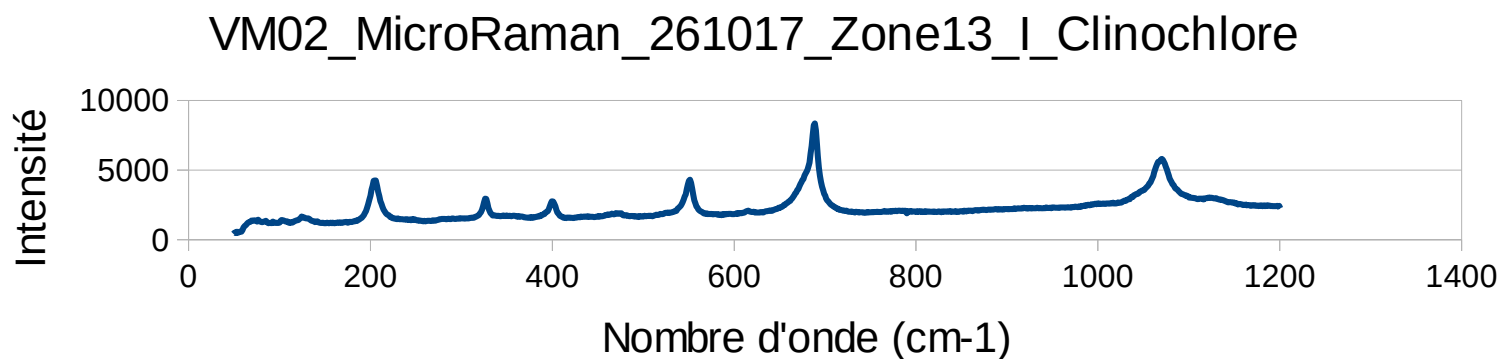
Date : 26/10/17

Plage d'analyse : 50-1200  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 1  $\text{cm}^{-1}$

Remarques : Signal dominé par celui de l'émeraude, voir VM02\_MicroRaman\_261017\_RéférenceBéryl

Pics caractéristiques identifiés : 102, 127, 204, 355, 472, 551, 670  $\text{cm}^{-1}$





Nom : VM02\_EDSMEB\_261017\_Zone13\_I\_Clinochlore

Appareil : JEOL 5800LV

Date : 26/10/17

Tension d'accélération (kV) : 15

Courant (nA) : 0,5

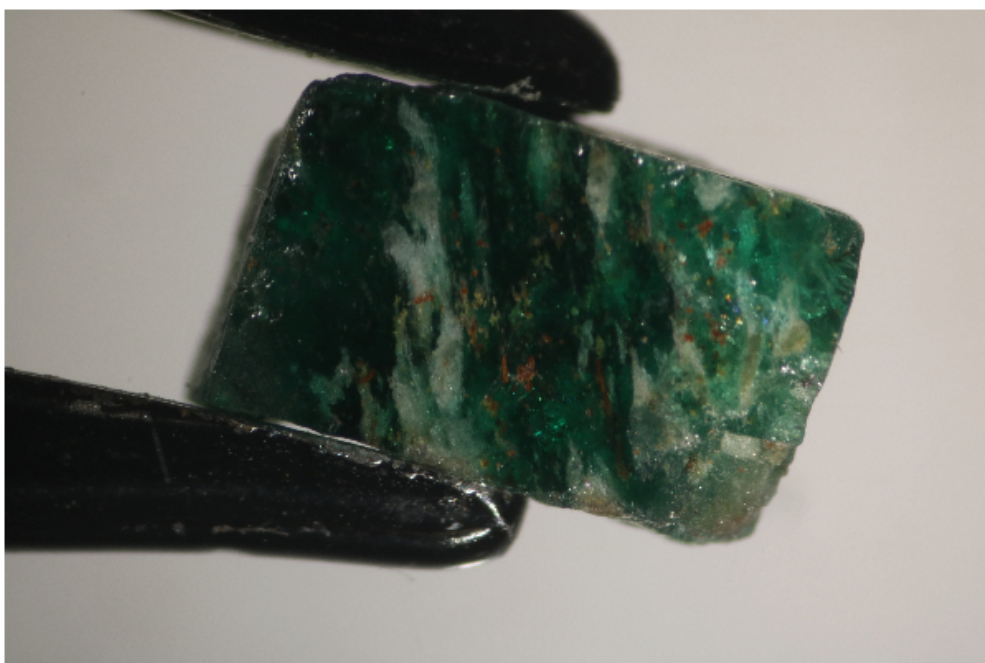
Quantification EDS :

| VM02_EDSMEB_261017_Zone13_I_Clinochlore |       |       |       |      |      |               |
|-----------------------------------------|-------|-------|-------|------|------|---------------|
| Chimie (a%)                             |       |       |       |      |      | Bouclage (w%) |
| O                                       | Mg    | Si    | Al    | Fe   | Cr   |               |
| 48,68                                   | 17,74 | 15,82 | 10,71 | 5,18 | 0,83 | 69,22         |

Photographies



VM02



VM02 - Paysage d'inclusions

### 8.3. VM03

#### **Gemmologie classique**

Espèce : Béryl

Variété : Émeraude

Provenance géologique : Jharkhand

Propriétaire : GGTL Laboratories

Date d'entrée : Automne 2016

Poids (ct) : 0,72 ct

Dimensions (mm) : 5,2 x 4,7 x 3,9 mm

Taille : Brut

Couleur : Vert (pas de distribution de couleur)

Transparence : Transparent

Particularités : Très inclus

Indice de réfraction : / (pas de faces polies)

Biréfringence : / (pas de faces polies)

Signe optique : / (pas de faces polies)

Pléochroïsme : Vert / Vert-Bleu (faible)

Comportement au polariscope : Rétablit la lumière au 1/4 de tour

Densité : 2,667

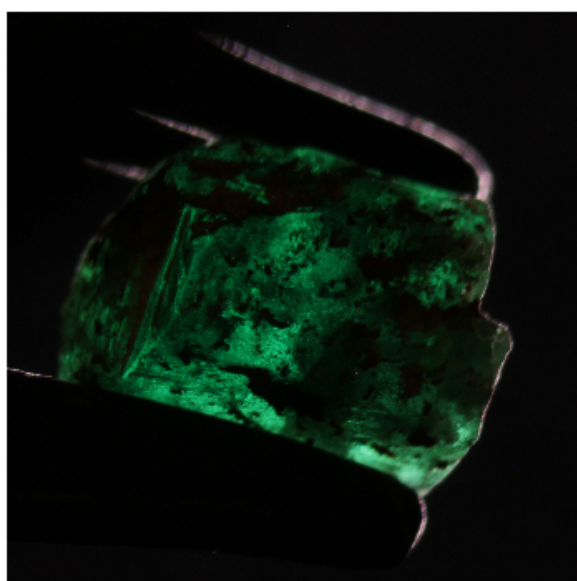
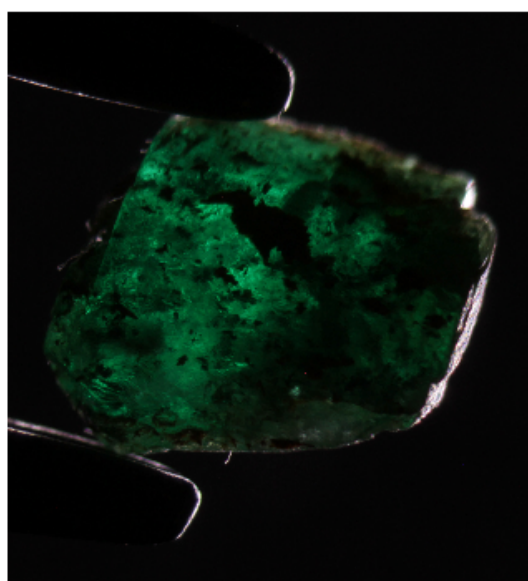
Réaction UVL : Inerte

Réaction UVC : Inerte

Photographies



VM03



VM03 - Faces prismatiques  
(Lumière transmise)

#### 8.4. VM04

##### Gemmologie classique

Espèce : Béryl

Variété : Émeraude

Provenance géologique : Jharkhand

Propriétaire : GGTL Laboratories

Date d'entrée : Automne 2016

Poids (ct) : 0,65 ct

Dimensions (mm) : 4,9 x 4,5 x 3,1 mm

Taille : Brut, 2 faces prismatiques polies

Couleur : Vert (pas de distribution de couleur)

Transparence : Transparent

Particularités : Très inclus

Indice de réfraction : 1,592 / 1,600

Biréfringence : 0,008

Signe optique : U<sup>-</sup>

Pléochroïsme : Vert / Vert-Bleu

Comportement au polariscope : Rétablit la lumière au 1/4 de tour

Densité : 2,708

Réaction UVL : Inerte

Réaction UVC : Inerte

### Spectroscopie IR de l'émeraude

Nom : VM04\_TransmissionIR\_231116

Appareil : FTIR Bruker Vertex 70

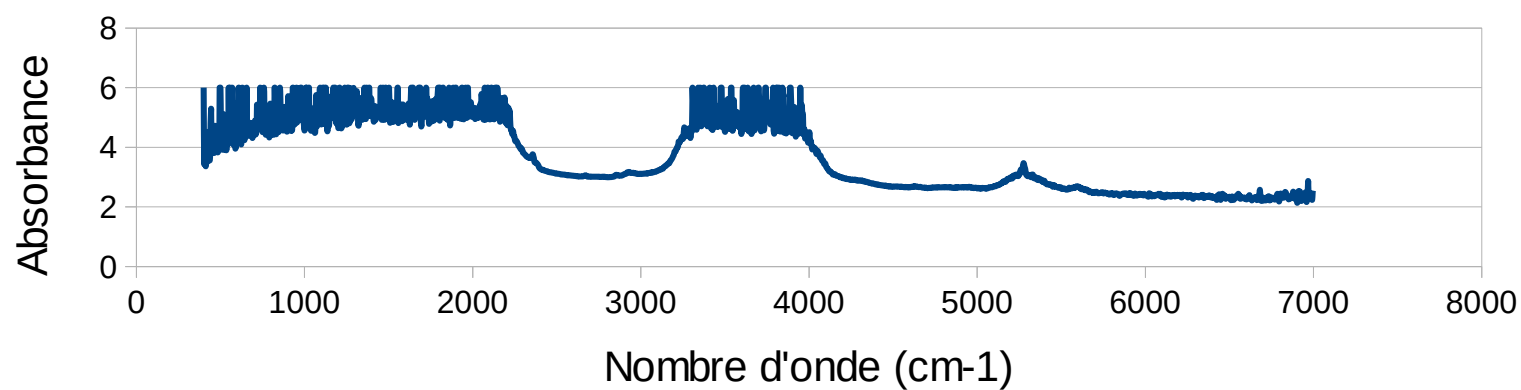
Date : 23/11/16

Plage d'analyse : 7000-400  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 4  $\text{cm}^{-1}$

Pics identifiés : 5593, 5276, 4630, massif 4000-3200, 2670, 2373, 2356  $\text{cm}^{-1}$

### VM04\_TransmissionIR\_231116



Photographies



VM04



VM04 - Paysage d'inclusions

### 8.5. VM05

#### **Gemmologie classique**

Espèce : Béryl

Variété : Émeraude

Provenance géologique : Jharkhand

Propriétaire : GGTL Laboratories

Date d'entrée : Automne 2016

Poids (ct) : 0,77

Dimensions (mm) : 5,5 x 4,8 x 3,1

Taille : Brut, 2 faces prismatiques polies

Couleur : Vert (pas de distribution de couleur)

Transparence : Transparent

Particularités : Très inclus

Indice de réfraction : 1,592 / 1,600

Biréfringence : 0,008

Signe optique : U<sup>-</sup>

Pléochroïsme : Vert / Vert-Bleu (faible)

Comportement au polariscope : Rétablit la lumière au 1/4 de tour

Densité : 2,655

Réaction UVL : Inerte

Réaction UVC : Inerte



### Spectroscopie Raman et IR de l'émeraude

Nom : VM05\_MicroRaman\_251017\_RéférenceBéryl

Appareil : Raman dispersif Labram HR

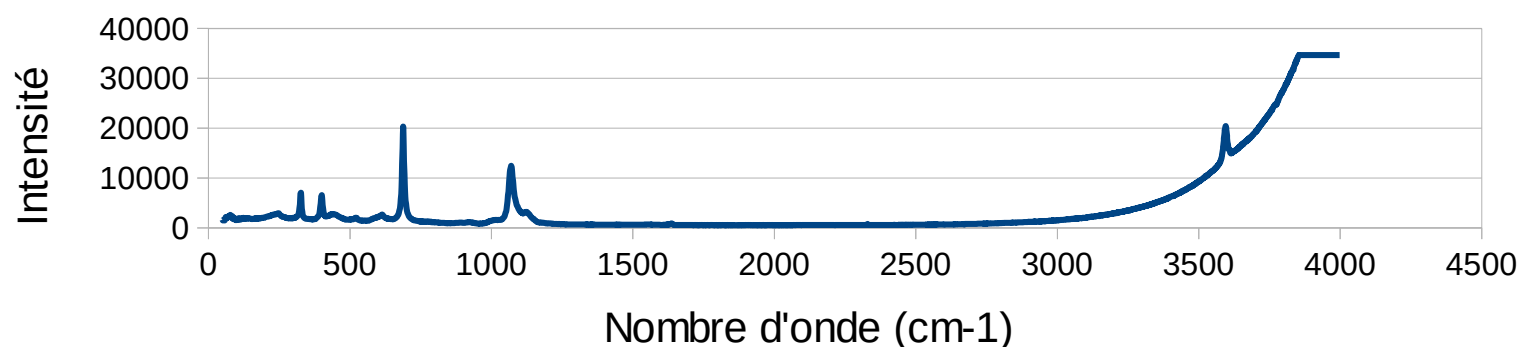
Date : 25/10/17

Plage d'analyse : 50-4000  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 1  $\text{cm}^{-1}$

Pics identifiés : 77, 248, 327, 400, 444, 521, 614, 688, 1007, 1071, 1124, 1637, 3595, 3608  $\text{cm}^{-1}$

#### VM05\_MicroRaman\_251017\_RéférenceBéryl



Nom : VM05\_TransmissionIR\_231116

Appareil : FTIR Bruker Vertex 70

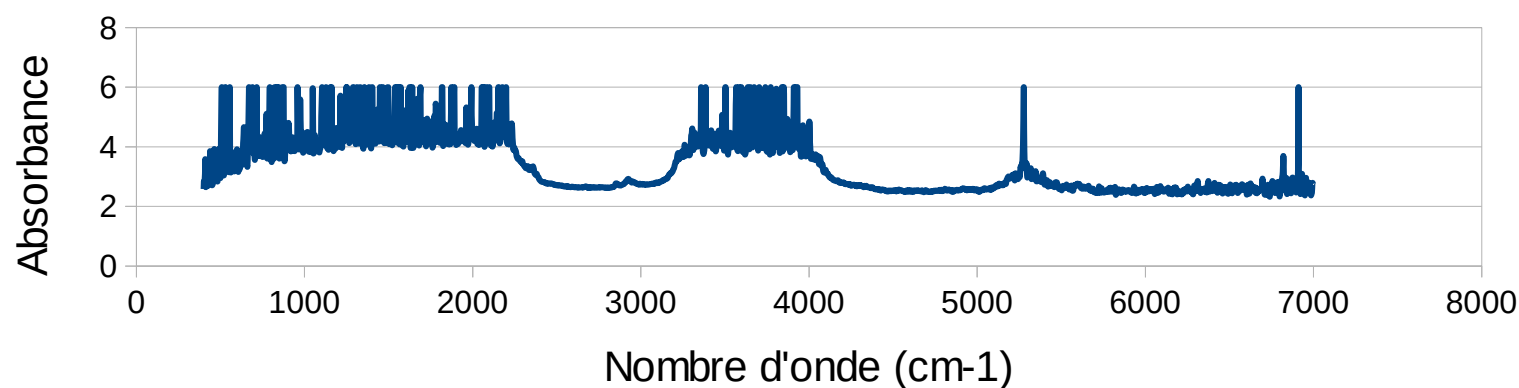
Date : 23/11/16

Plage d'analyse : 7000-400  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 4  $\text{cm}^{-1}$

Pics identifiés : 5278, massif 4100-3200, 2378, 2358  $\text{cm}^{-1}$

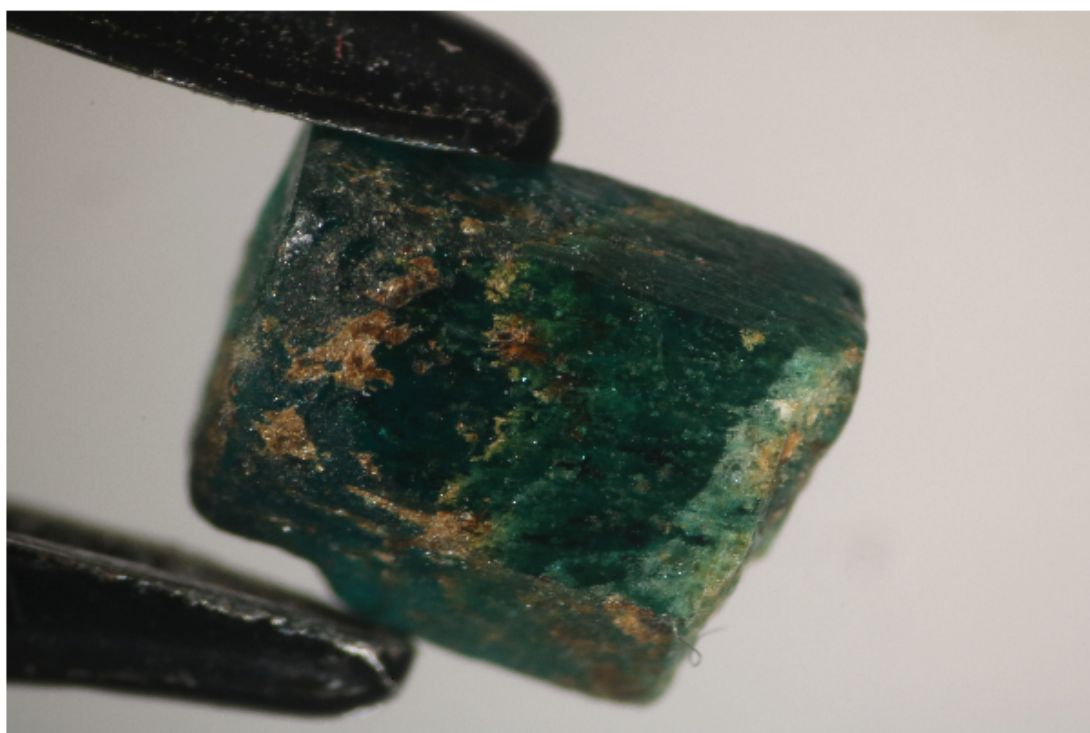
#### VM05\_TransmissionIR\_231116



Photographies



VM05



VM05 - Paysage d'inclusions

## 8.6. VM06

### Gemmologie classique

Espèce : Béryl

Variété : Émeraude

Provenance géologique : Jharkhand

Propriétaire : GGTL Laboratories

Date d'entrée : Automne 2016

Poids (ct) : 0,29

Dimensions (mm) : 4,8 x 3,9 x 1,9

Taille : Brut, 2 faces prismatiques polies

Couleur : Vert (pas de distribution de couleur)

Transparence : Transparent

Particularités : Moyennement inclus

Indice de réfraction : 1,590 / 1,600

Biréfringence : 0,010

Signe optique : U<sup>-</sup>

Pléochroïsme : Vert / Vert-Bleu

Comportement au polariscope : Rétablit la lumière au 1/4 de tour

Densité : 2,636

Réaction UVL : Inerte

Réaction UVC : Inerte

## Spectroscopie Raman de l'émeraude et d'une inclusion de quartz

### Référence émeraude :

Nom : VM05\_MicroRaman\_251017\_RéférenceBéryl

Appareil : Raman dispersif Labram HR

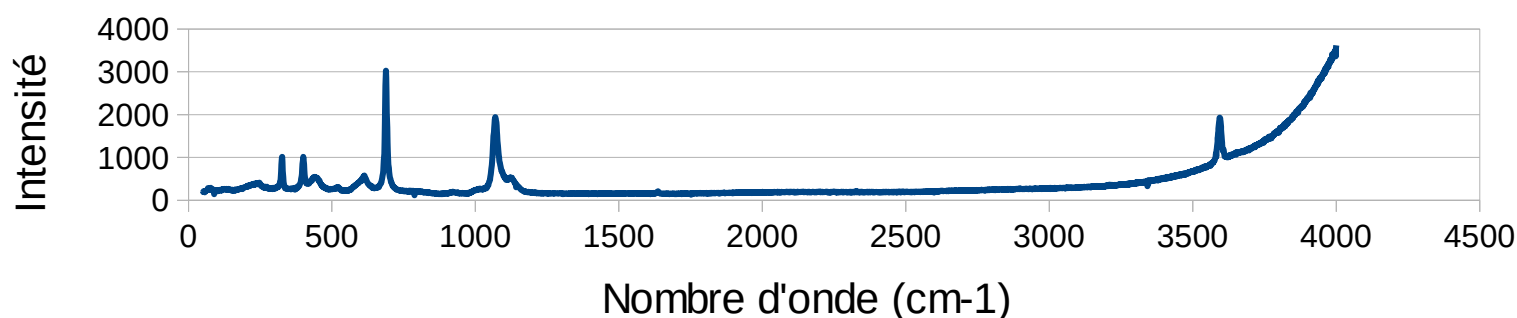
Date : 25/10/17

Plage d'analyse : 50-4000  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 1  $\text{cm}^{-1}$

Pics identifiés : 247, 327, 400, 442, 520, 614, 688, 1009, 1071, 1124, 1638, 3596, 3608  $\text{cm}^{-1}$

### VM06\_MicroRaman\_251017\_RéférenceBéryl



### Zone 1, Tir I, Quartz (effectué au milieu de la veine de quartz parcourant l'échantillon) :

Nom : VM06\_MicroRaman\_251017\_Zone1\_I\_Quartz

Appareil : Raman dispersif Labram HR

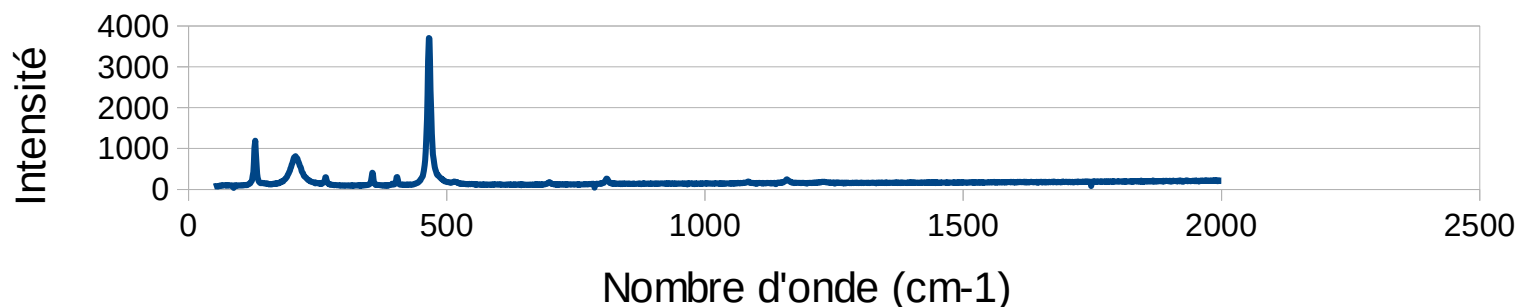
Date : 25/10/17

Plage d'analyse : 50-2000  $\text{cm}^{-1}$

Résolution spectrale : 1  $\text{cm}^{-1}$

Pics identifiés : 129, 207, 266, 356, 404, 465, 516, 699, 810, 1083, 1159 et 1232  $\text{cm}^{-1}$

### VM06\_MicroRaman\_251017\_Zone1\_I\_Quartz



Photographies



VM06



VM06 - Paysage d'inclusions

### 8.7. VM07

#### **Gemmologie classique**

Espèce : Béryl

Variété : Émeraude

Provenance géologique : Jharkhand

Propriétaire : GGTL Laboratories

Date d'entrée : Automne 2016

Poids (ct) : 0,66

Dimensions (mm) : 6,9 x 3,1 x 3,1

Taille : Brut

Couleur : Vert (pas de distribution de couleur)

Transparence : Transparent

Particularités : Très inclus

Indice de réfraction : / (pas de faces polies)

Biréfringence : / (pas de faces polies)

Signe optique : / (pas de faces polies)

Pléochroïsme : Vert / Vert-Bleu (faible)

Comportement au polariscope : Rétablit la lumière au 1/4 de tour

Densité : 2,640

Réaction UVL : Inerte

Réaction UVC : Inerte

Photographies



VM07 - Face prismatique



VM07 - Face basale