

ANNÉE 2014

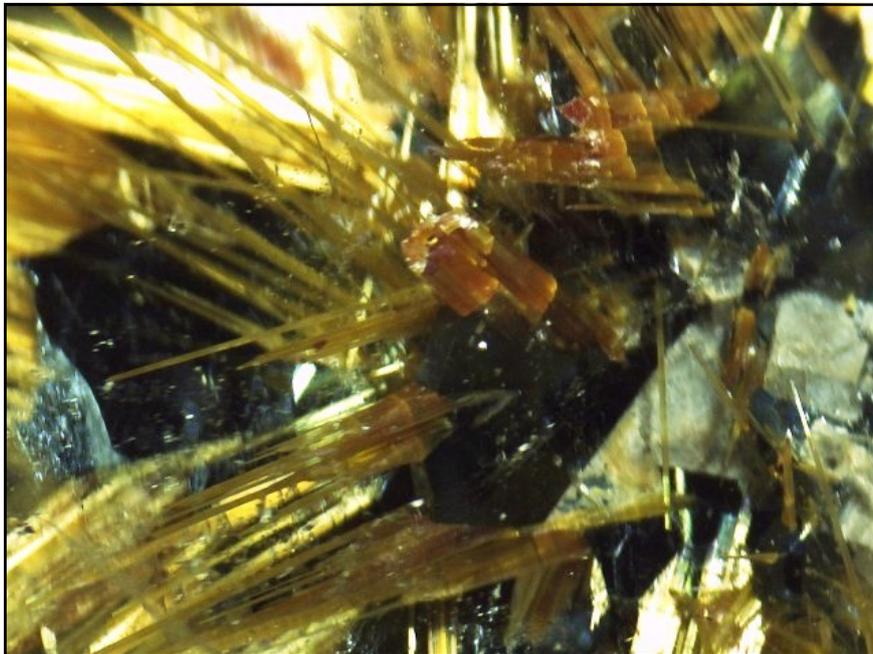
DIPLÔME D'UNIVERSITÉ DE GEMMOLOGIE

Présenté devant l'Université de Nantes

U.F.R des Sciences et des Techniques par

Mme Anne BOISSERAND

***Étude de quelques inclusions solides
dans le quartz***



**soutenu publiquement le 3 mars 2016
au Département des Sciences de la Terre et de l'Univers
devant la commission d'examen composée de :**

**M. E. FRITSCH
M. B. RONDEAU
M. F. NOTARI
M. C. EWELS
M. Y. MORIZET
M. S. KARAMELAS**

**Professeur
Maître de Conférences
Directeur, Gemtechlab
Chargé de Recherches
Maître de Conférences
Senior Researcher,
Gem Research Swisslab (GRS)
Professeur émérite**

**Président
Vice-Président
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur**

M. B. LASNIER

Invité

SOMMAIRE

Introduction

CHAPITRE I - État de connaissances

A - Généralités sur le quartz

1	Le quartz, formation et gîtologie	3
2	Chimie	3
3	Structure cristalline	3
4	Macles	4
5	Propriétés physiques et optiques	4

B - Les différents types d'inclusions du quartz

1	Les inclusions protogénétiques	5
2	Les inclusions syngénétiques	5
3	Les inclusions épigénétiques	5

C - Description

1	Les inclusions solides	5
2	Les inclusions fluides	6
3	Les particularités de croissance	6

D - Les principales inclusions solides dans le quartz

1	Tableau des inclusions solides du quartz par classe chimique	7
2	Tableau des appellations commerciales et interdites	8
3	Tableau descriptif des principales inclusions dans le quartz	9

CHAPITRE II Matériaux et méthodes

A - Présentation des échantillons

21

B - Description des méthodes d'analyses

22

1	Gemmologie classique	22
2	Gemmologie de laboratoire	23

CHAPITRE III Résultats

25

CHAPITRE IV Discussion et conclusion

71

Bibliographie

73

Remerciements

82

INTRODUCTION

Mon choix de mémoire a été influencé naturellement par ma passion pour les inclusions dans les gemmes et la macrophotographie. Je porte un intérêt particulier au quartz, je le trouve fascinant et intéressant pour plusieurs raisons :

- Dans le quartz nous sommes confrontés à une grande richesse de variétés.
- Sa structure cristalline est complexe et ambiguë dans la terminologie (Nespolo, 2008).
- Il présente également sous sa forme de quartz alpha environ une trentaine de macles différentes (Boulliard, 2010).

Pourquoi ai-je choisi les inclusions dans le quartz?

Auparavant, le quartz à inclusions était apprécié uniquement des collectionneurs, j'ai remarqué depuis quelque temps qu'il est de plus en plus présent chez les bijoutiers et artisans joailliers, il semble prendre une place de plus en plus importante dans le monde des gemmes.

Grâce à certaines inclusions, le cristal de roche peut également prendre des couleurs inhabituelles et devenir orange, bleu, vert ou bien encore rouge.

Plus de 170 espèces différentes ont été recensées à ce jour en inclusion dans le quartz (Hyrsi & Niedermayr, 2003). Cette diversité pose un problème d'identification dû à la méconnaissance des inclusions. Peu ont été étudiées de manière scientifique et malheureusement des informations trompeuses peuvent se propager chez les professionnels. Sur les stands de Sainte-Marie aux Mines en 2013, des cristaux de quartz à fantômes de croissance vert pâle en provenance d'Ambatofinandrahana à Madagascar étaient présentés comme étant de la fuchsite ou de la céladonite selon les vendeurs interrogés (Le règne minéral, 2013, N°112 page 22).

L'objectif de ce mémoire par le biais des instruments de gemmologie de laboratoire est d'apprendre à reconnaître certaines inclusions ou l'identification peut être ambiguë tel que la fluorite et la cristobalite, d'élucider pourquoi la gilarite est parfois verte plutôt que bleue, de déterminer par quels mécanismes le quartz peut devenir bleu, tant de mystères énigmatiques à mes yeux.

Ce mémoire est composé de quatre chapitres, j'ai choisi d'étudier 15 échantillons plus ou moins atypiques. Le premier chapitre est consacré à l'état des connaissances.

- Je présente succinctement des généralités sur la structure et les propriétés physiques et optiques du quartz.
- J'aborde les différents types d'inclusions que nous pouvons trouver dans les matériaux gemmes ainsi que leurs descriptions.
- Je présente sous forme de tableau, une synthèse des principales inclusions solides rencontrées dans le quartz. Pour mener à bien ce projet, j'ai fait des recherches dans différentes publications gemmologiques, Magic World Inclusions in Quartz de Jaroslav Hyrsi et Gerhard Niedermayr, Photoatlas volume 2 de E.J. Gübelin et J.I. Koivula, ainsi que dans la revue de Gems&Gemology où j'ai recensé plus d'une quarantaine d'articles. Je tiens à préciser que ce tableau est loin d'être exhaustif.

Pour le deuxième chapitre, j'aborde les techniques de gemmologie classique et de laboratoire (MEB et spectrométrie à diffusion Raman) qui vont me permettre d'obtenir la juste identification de mes échantillons.

Le troisième chapitre expose les résultats obtenus. Ils sont présentés échantillon par échantillon et non pas méthode par méthode, dans un souci de clarté de lecture.

Pour terminer le quatrième chapitre est une discussion – conclusion sur les avancées obtenues et les difficultés rencontrées.

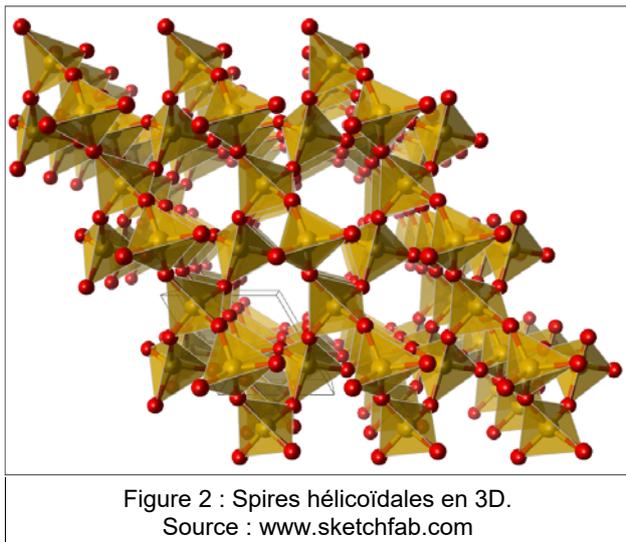
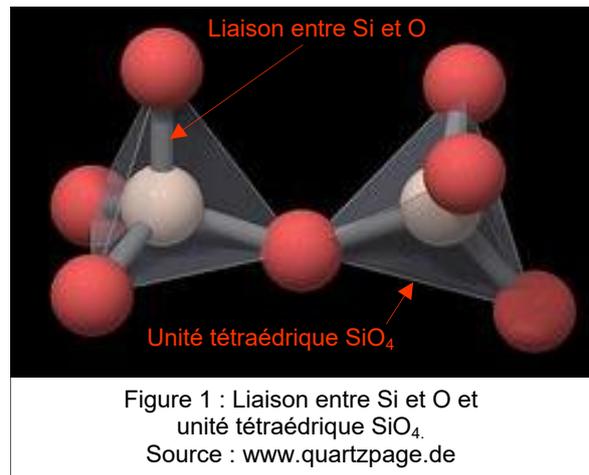
A - Généralités

1 - Formation et gîtologie

Ce minéral constitue environ 12% en volume de la croûte terrestre, il est un constituant majeur des roches éruptives, métamorphiques et sédimentaires. Les cristaux de quartz se trouvent dans des cavités, des géodes au sein des porphyres et des pegmatites granitiques, mais également sous forme de galets dans les dépôts alluvionnaires. Les principaux gisements se trouvent au Brésil, en Chine, à Madagascar, en Russie et dans les Alpes (Bishop et al., 2001).

2 - Chimie

Le quartz est un dioxyde de silicium de formule chimique SiO_2 . La liaison chimique silicium oxygène (Si-O) est importante puisqu'elle est la base de tous les matériaux gemmes silicatés. Dans le quartz, l'oxygène est lié au silicium selon une coordination tétraédrique (figure 1) à liaison forte comportant quatre atomes d'oxygène pour un atome de silicium (Deferne, 2014).



Étant donné que tous les tétraèdres (SiO_4) mettent leurs 4 atomes d'oxygène en commun avec ceux des tétraèdres voisins, il n'y a donc que 2 atomes d'oxygène pour un atome de silicium (SiO_2). Ces tétraèdres (SiO_4) sont liés ensemble par leurs sommets et forment des spires hélicoïdales (figure 2), hélice droite ou gauche selon un axe de symétrie d'ordre 3 (Deferne, 2014).

3 - Structure cristalline

La silice a la propriété de cristalliser sous différentes formes en fonction des diverses conditions géologiques de pression et de température. La structure la plus courante du quartz est la forme stable de la silice cristallisant à une température inférieure à 573°C dans le système rhomboédrique. On la désigne sous le nom de quartz α . On trouve d'autres formes stables de la silice à des températures supérieures à 573°C à la cristallisation hexagonale pour le quartz β et la tridymite ou à la cristallisation cubique pour la cristobalite. Il existe aussi deux autres formes stables, mais de haute pression, la coésite et la stishovite (Deferne, 2014).

"Le quartz α " présente 4 axes de symétrie, 1 axe d'ordre 3 (axe "vertical") et 3 axes d'ordre 2 (axes horizontaux) formant entre eux des angles de 120° (figure 3). Il présente un habitus prismatique de forme pseudo-hexagonale (figure 4) composé de deux rhomboèdres, majeur face (10-11) et mineur face (01-11) ayant chacun un développement différent, tourné de 60° l'un par rapport à l'autre (Deferne, 2014). Ceci est la forme la plus habituelle du quartz α . Les faces du prisme sont souvent striées selon un plan perpendiculaire à l'axe C. Un autre habitus est celui du trapézoèdre dont les faces se situent en haut de celles du prisme.

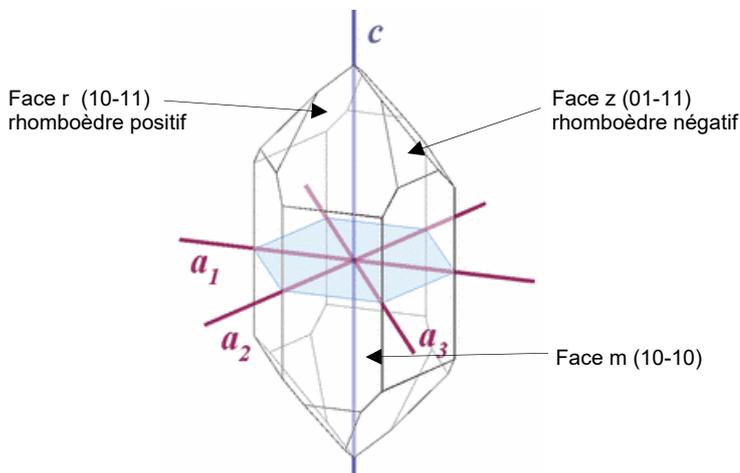


Figure 3 : Faciès simple du quartz.
Source : www.quartzpage.de

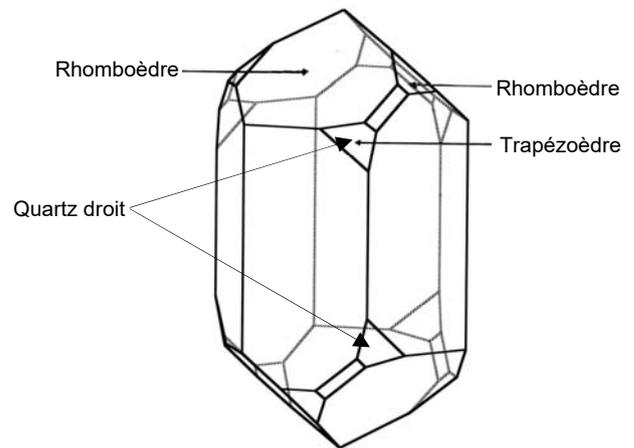


Figure 4 : Cristal de quartz présentant des faces qui permettent de déterminer la chiralité.
(Boulliard, 2010).

4 - Macles

Les macles sont une association régulière de deux ou plusieurs cristaux d'orientation différente de la même espèce minérale, suivant les lois géométriques directement liées à la symétrie vraie ou approchée du réseau cristallin (Comm. Pers., E. Fritsch, 2015).

Les macles courantes sont difficiles à observer, ce n'est que la répétition insolite de certaines faces spécifiques (le trapézoédrique, par exemple) qui permet d'en détecter la présence (Deferne, 2014).

- La macle du Dauphiné (macle électrique) est la plus fréquente. Elle est presque toujours une macle par pénétration où les deux cristaux sont tournés à 180° l'un par rapport à l'autre. Théoriquement, elle n'est décelable qu'en présence des 6 faces du trapézoédrique ou de faces "accessoires" (Deferne, 2014).
- La macle du Brésil (macle optique ou macle chirale) est moins fréquente, elle est presque toujours une macle par pénétration. Les deux individus cristallins qui la composent sont reliés par une réflexion selon un plan parallèle à un plan {11.0} du prisme. Elle combine un quartz droit et gauche. Chaque individu a un pouvoir rotatoire différent, ce qui altère les caractéristiques optiques du quartz (Boulliard, 2010).
- La macle du Japon ou de la Gardette est une macle où les deux individus sont inclinés l'un par rapport à l'autre et forment un angle rentrant de 84°33' (Boulliard, 2010).

5 - Propriétés physiques et optiques

Système cristallin	Rhomboédrique
Dureté	7
Clivage	Indistinct
Cassure	Conchoïdale
Densité	Environ 2,65
Indice de réfraction	No = 1,544 Ne = 1,553
Biréfringence	0,009
Caractère optique	Uniaxe positif
Éclat	Vitreux
Dispersion	Faible (0.013)
Luminescence	Aucune

Tableau 1 : Résumé des principales caractéristiques du cristal de roche. Source : www.gemmo.eu

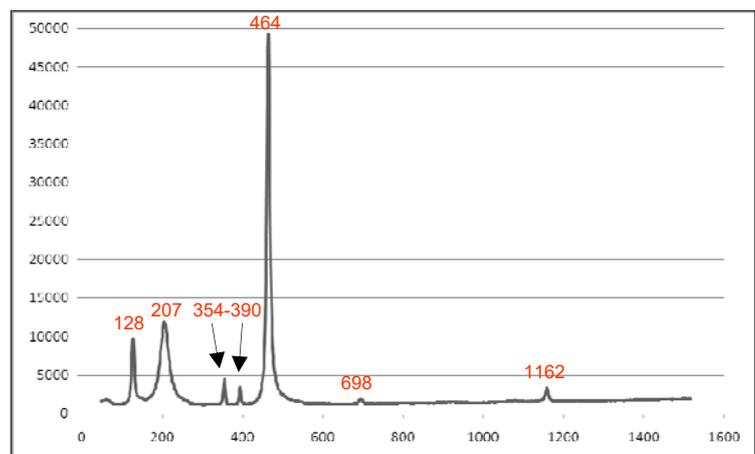


Figure 5 : Spectre Raman du quartz R050125.3.
Pic principal à 464 cm⁻¹, deux autres significatifs à 128 et 207 cm⁻¹.
Source : www.ruff.info

Le spectre Raman du quartz (figure 5) présente un pic principal à 464 cm⁻¹, deux autres pics significatifs à 128 et 207 cm⁻¹, et quatre autres à 354, 390, 698 et 1162 cm⁻¹. Il servira de spectre de référence tout au long de ce mémoire.

B - Les différents types d'inclusions

Les inclusions sont des matières solides, liquides ou gazeuses à une, deux ou trois phases piégées dans les cristaux lors des divers événements qu'elles subissent au fil des temps géologiques. Elles racontent une histoire, celle du minéral et de sa formation et constituent une sorte de carte d'identité pour les inclusions diagnostiques d'une espèce ou d'une gîtologie particulière. Il existe trois sortes de formation d'inclusions, dans certains cas, elles peuvent coexister au sein d'un même cristal.

1 - Les inclusions protogénétiques

Ce sont des inclusions primaires, c'est-à-dire qu'elles existaient à l'état de particules avant que se forme le cristal hôte. Ces inclusions de cristaux non altérés ont été piégées lors de la croissance du minéral, elles sont strictement de nature solide. Généralement, ces inclusions cristallines automorphes sont préservées, hormis celles de petites dimensions (quelques microns) qui peuvent subir par pression un clivage ou une cassure lors de la cristallisation du minéral hôte.

2 - Les inclusions syngénétiques

Ce sont des inclusions, solides, liquides ou gazeuses qui vont croître simultanément avec le quartz, mais à des vitesses de croissance différentes pour les substances, une peut même entourer l'autre. Les inclusions liquides et gazeuses ainsi que les multiphases sont de ce type, elles ont été piégées par le matériau au cours de sa formation. Pour les inclusions solides, la forme originelle peut être déformée rendant l'identification impossible sans outil de gemmologie de laboratoire.

3 - Les inclusions épigénétiques

Ce sont des inclusions formées après la croissance du minéral. Des matériaux étrangers tels que des oxydes de fer ou bien encore des "oxydes de manganèse" peuvent pénétrer par l'intermédiaire de fractures, fissures ou cavités existantes dans le cristal hôte et cristalliser. Le givre de guérison résulte d'un accident, une fissure ouverte pendant la croissance du cristal et le fluide pénètre la fracture.

C - Description

Voici une description sommaire des formes et divers aspects que peuvent revêtir ces inclusions.

1 - Les inclusions solides

La forme originelle des inclusions solides a pu être altérée par dissolution et ainsi modifier l'aspect des cristaux dans leurs longueurs, leurs angles ou leurs arêtes. L'habitus est le terme utilisé par les minéralogistes pour décrire l'aspect extérieur du minéral (isométrique, cubique, octaédrique, pyramidal...). Voici quelques habitus ou faciès cristallins fréquemment rencontrés dans les inclusions solides (Hatert, 2013) :

- Isométrique : les dimensions du cristal inclus sont sensiblement égales suivant les trois directions de l'espace, exemple de la pyrite ou de la fluorite bleue dans le quartz.
- Prismatique : le cristal possède un ensemble de plusieurs faces cristallines toutes parallèles à la même direction.
- Tabulaire : ces cristaux sont formés, ils sont caractérisés par leur croissance suivant deux directions de l'espace. Ils peuvent présenter des faciès aplatis ou foliacés.
- Allongé : Les cristaux allongés se sont développés suivant une seule direction. Exemple le faciès colonnaire de la tourmaline ou le faciès aciculaire du rutile.
- Lamellaire : les cristaux sont souvent plats, de faible épaisseur et allongés, sans forme géométrique précise. Ils peuvent prendre un aspect foliacé comme dans le cas du mica.

Lorsque les cristaux sont groupés en agrégats, certains termes sont utilisés pour les décrire (Hatert, 2013) :

- Aciculaire : les cristaux en forme d'aiguilles sont caractérisés par leur allongement et leur faible section, ces aiguilles peuvent être longues ou courtes avec une orientation, soit aléatoires (exemple: les amphiboles), soit dans un même plan.
- Botryoïdal : agrégats de cristaux en forme de grappe.

- Capillaire : c'est un réseau de cristaux très fins comme des cheveux.
- Dendritique : c'est une arborescence de micro-cristaux appelée dendrite.
- Fibreux : les fibres peuvent être courtes, longues, souples, flexueuses, se regrouper en touffe ou partir de plusieurs centres.
- Fibro-radié: les cristaux sont allongés et rayonnants.
- Foliacé ou micacé: les cristaux sont en feuillet aplati ou en lame très mince.
- Globulaire : les cristaux sont en forme de portion de sphère.
- Granulaire: les cristaux sont des petits grains sensiblement isométriques.

2 - Les inclusions fluides

Ce sont des cavités de petite taille souvent microscopique au sein d'un minéral. Elles sont remplies par des fluides piégés pendant la croissance du cristal ou après sa formation. Les inclusions liquides nous renseignent sur les conditions de genèse du cristal ainsi que les événements géologiques postérieurs à celle-ci (Dubois, 2003).

Elles peuvent avoir plusieurs origines :

Primaire: elles se sont formées lors de la précipitation, elles contiennent le fluide nourricier présent au moment de la formation du minéral.

Pseudo-secondaire: elles se sont formées pendant la croissance du minéral par l'intermédiaire de micro fracture.

Secondaire: elles se sont formées quand la croissance du cristal s'est achevée, par cicatrisation tardive des fractures, le long des fissures, des plans de macle ou de clivage.

Elles peuvent contenir des inclusions monophasées, biphasées ou triphasées.

Les données du paragraphe qui suit sont tirés de Shepherd et al. (1985).

L'inclusion monophasée : peut contenir un gaz sous forme de libelle, une phase vapeur de faible densité de type (CO₂, CH₄, N₂) ou un liquide tel qu'une solution saline, de l'eau ou du pétrole.

L'inclusion biphasée est riche soit en liquide dominant, soit en gaz dominant.

L'inclusion triphasée est constituée d'une phase aqueuse saturée en sel, d'une phase gazeuse accompagnée parfois d'un ou plusieurs solides. Il faut une variation de température pour que les sels présents dans les solutions puissent cristalliser (halite, sylvite, anhydrite).

L'inclusion immiscible est caractérisée par la présence de deux liquides non miscibles tels que l'eau et des hydrocarbures.

Le cristal négatif que l'on peut rencontrer dans le quartz est une lacune de cristallisation dont la caractéristique principale est de reprendre fidèlement la forme cristalline du cristal hôte. Il peut contenir des matières solides, liquides ou gazeuses. Les canaux liquides, les réseaux liquides et les givres sont des cavités contenant naturellement un fluide.

3 - Les particularités de croissance

Les particularités de croissance sont dues à des variations des conditions physico-chimiques (pression, température, pH...) pendant les phases de cristallisation.

Le quartz sceptre est l'exemple d'un ensemble de deux phases distinctes de cristallisation. Un cristal de deuxième génération va se développer à partir de l'extrémité du cristal de première génération (Gillet & Thomas, 2002).

Les fantômes que l'on peut voir dans certains cristaux de quartz sont dus à des arrêts et des reprises de croissance pendant la formation du cristal.

Les secteurs de croissance sont des zones de couleurs droites, des chevrons ou des zones contrastées, ces irrégularités de croissance sont dues à des variations de composition chimique lors de la croissance du cristal.

D - Les principales inclusions solides dans le quartz

Avec plus de 170 espèces minérales recensées à ce jour, le cristal de roche est certainement le minéral hôte qui comporte le plus d'inclusions différentes. Toutes les classes chimiques sont représentées (Hyrsl & Niedermayr, 2003).

1 - Tableau des inclusions solides du quartz par classe chimique

Classe chimique	Inclusions minérales
Éléments natifs	Argent, bismuth, carbone (diamant et graphite), cuivre, or, soufre, tellure
Sulfures et sulfosels	Acanthite, aikinite, arsénopyrite, aschamalmite, bismuthinite, boulangerite, bourmonite, calaverite, chalcopyrite, cinabre, cobaltite, cosalite, covellite, dufrenoyite, emplectite, galène, galenobismuthite, gersdorffite, giessenite, gustavite, heyrovskyite, izoklakeite, jamesonite, kobellite, marcassite, meneghinite, millerite, molybdenite, orpiment, paakkonenite, pyrargyrite, pyrite, pyrrhotite, realgar, sphalérite, stannite, stéphanite, sterryite, stibnite, tetrahedrite, zinkenite
Halogénures	Atacamite, fluorite, halite, paratacamite
Oxydes et hydroxydes	Anatase, ankangite, bindheimite, brannerite, brookite, cassiterite, cervantite, chalcotrichite, columbite, cristobalite, cuprite, ferrotantalite, goethite, hématite, hollandite, ilménite, lépidocrocite, limonite, magnétite, manganite, microlite, manganèse, pyrochlore, pyrolusite, romanechite, rutil, stibiconite, tantalite, valentinite
Carbonates et nitrates	Ankérite, aragonite, azurite, beyerite, calcite, dolomite, magnésite, malachite, parisite, rhodochrosite, sidérite, synchysite
Borates	Hambergite
Sulfates	Anhydrite, baryte, célestite, gypse, jarosite
Phosphates, arséniates et vanadates	Apatite, cacoxenite, gormanite, lazulite, lithiophilite, monazite, panasqueiraite, scorzalite, svanbergite, tangéite, triploidite, triphylite, trolléite, xenotime
Molybdates et tungstates	Ferberite, hubnerite, scheelite, wolframoixiolite
Silicates groupe des amphiboles	Actinolite (amiante, byssolite), arfvedsonite, edenite, grunerite, hastingsite, hornblende, magnésioriebeckite, richterite, riebeckite (crocidolite), trémolite
Silicates groupe des béryls	
Silicates groupe des chlorites	Chamosite, clinochlore, cookéite, ripidolite, sheridanite, sudoïte
Silicates groupe des feldspaths	Albite, celsiane, orthose, plagioclase
Silicates groupe des grenats	Almandin, andradite, caldérite, grossulaire hessonite, spessartite
Silicates groupe des micas	Biotite, céladonite, fuchsite, lépidolite, muscovite, phlogopite
Silicates groupe des pyroxènes	Acmite, aegirine, diopside, hedenbergite, omphacite, violane
Silicates groupe des tourmalines	Dravite, elbaïte, schörl, uvite
Autres Silicates	Aerinite, ajoïte, allanite(ce), astrophyllite, axinite, babingtonite, bertrandite, braunite, charoïte, chrysocolle, clinozoisite, diopside, disthène, dumortierite, épididymite, épidote, gilalite, helvite, hennomartinite, hubeite, ilvaïte, kaolinite, kinoite, macfallite, manganbabingtonite, minasgeraisite, montmorillonite, népouite, papagoïte, parasepiolite, phénacite, piemontite, planchéite, pumpellyite, pyrophyllite, pyroxmangite, quartz, rhodonite, scapolite, shattuckite, sillimanite, sogdianite, sphène, spodumène, sugilite, thortveitite, tinzenite, topaze, thulite, zircon

Tableau 2 : Synthèse des inclusions présentes dans le quartz, d'après (Hyrsl & Niedermayr, 2003), (Gübelin & Koivula, 2005) et T. Pradat (www.gemmo.eu).

2 - Tableau des appellations commerciales et interdites

Ce tableau décrit succinctement les différentes appellations que l'on rencontre dans le commerce, certaines sont interdites pour des raisons évidentes de tromperie.

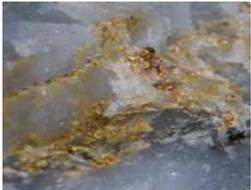
Appellations commerciales	
Apricotine	Quartz de couleur abricot comportant des oxydes de fer, provenance New Jersey, U.S.A
Cheveux de Thétis	Quartz à amphibole verte, variété actinolite
Cheveux de Vénus	Quartz à inclusions de rutile doré
Churrasco quartz	Quartz à inclusion de chamosite associées à des aiguilles de schörl
Dream quartz	Quartz à inclusions d'épidote
Flèches d'amour	Quartz à inclusion de tourmaline schörl
Jacinto de Compostela	Appellation locale d'un quartz à inclusions d'hématite
Quartz araignée	Appellation commerciale du quartz à inclusions de hollandite
Quartz aventuriné	Quartz à inclusions de mica chromifère, variété fuchsite
Quartz à tangerine	Ou quartz mandarine, quartz orange teinté par divers oxydes de fer
Quartz eisenkiesel	Quartz orange à brun contenant diverses inclusions d'oxyde et hydroxyde de fer
Quartz girasol	Quartz à l'éclat laiteux presque opalescent
Quartz harlequin	Quartz à inclusions d'hématite, de goethite ou de lépidocrocite
Quartz hématoïde	Quartz comportant de nombreuses inclusions d'hématite rouge vif
Quartz lodolite	Appellation brésilienne d'un quartz à chlorite combiné à d'autres types d'inclusions de type oxyde de fer
Quartz papaya	Appellation malgache d'un quartz orange couleur papaye
Medusa quartz	Quartz à inclusions de gilalite bleue et verte
Pink fire quartz	Quartz à inclusions de covellite, petites plaquettes de ce sulfure de cuivre
Platinum quartz	Quartz à inclusions de brookite et/ou rutile argenté
Spider quartz	Quartz à inclusions de hollandite
Strawberry Quartz	Quartz rouge contenant une grande concentration de plaquettes d'hématite
Solavernite	Solaverna "nom de la mine au Mexique", quartz comportant de nombreux cristaux de marcassite
Sunset quartz	Quartz jaune à jaune orangé comportant de nombreuses inclusions aciculaires microscopiques découvert au Minas Gerais, Brésil

Tableau 3 : Appellations commerciales et interdites, d'après T. Pradat (www.gemmo.eu) et (www.gemmology.ch).

3 - Tableau descriptif des principales inclusions dans le quartz

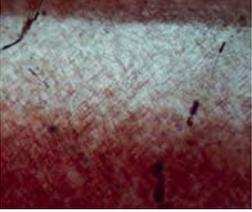
Ce tableau est un résumé de cinq lignes maximum présentant les inclusions fréquentes, rares ou exceptionnelles du quartz et les origines géographiques. Ce récapitulatif est non exhaustif.

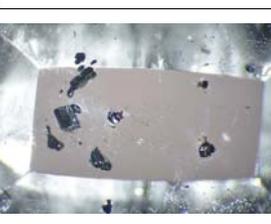
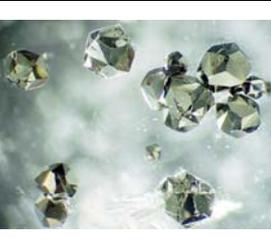
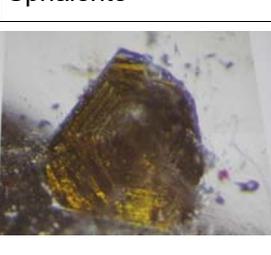
ÉLÉMENTS NATIFS

Argent	Ag	cubique
	L'argent natif peut présenter différents habitus. En inclusion dans le quartz, il se présenterait généralement en dendrites à l'éclat métallique. L'université de Bergakademie à Freiberg, Allemagne expose un prisme de quartz contenant une inclusion d'argent natif de 5 mm de long (Hyrsl & Niedermayr, 2003). Une étude a été réalisée sur des quartz provenant du Nouveau-Mexique, ils contenaient des cristaux octaédriques d'argent natif (Koivula, 1992). Schneeberg, Allemagne; Alhambra mine, Nouveau-Mexique, USA <i>Figure 6 : Argent inclus dans le quartz. Photo de J. Koivula.</i>	
Carbone (graphite)	C	cubique
	Le graphite est une inclusion souvent mentionnée, mais en réalité ces spécimens contiennent souvent des hydrocarbures amorphes de type anthraxolite ou asphaltite sous forme de fantômes. Du quartz contenant du graphite à l'habitus cylindrique a été trouvé dans la région de Bahia, Brésil (Hyrsl, 2004). Sichuan province, Chine; Herkimer Country, New York; Kuruwita, Sri Lanka. <i>Figure 7 : Quartz à inclusions de graphite cylindrique. Photo de J. Hyrsl.</i>	
Cuivre	Cu	cubique
	Des spécimens du Brésil vendus comme "Paraiba quartz" contiennent un nouveau type d'inclusion cuprifère formée de fibres fines et abondantes en forme de faisceau à la couleur typique de cuivre natif. Un test de conductivité électrique a confirmé cette hypothèse, mais la forme est inhabituelle pour du cuivre natif, il s'agit probablement d'une pseudomorphose de silicate de cuivre fibreux à l'origine. (Hyrsl, 2009). Messina, Afrique du Sud, Brésil. <i>Figure 8 : Nouveau "Paraiba" quartz. Photo de J. Hyrsl.</i>	
Or	Au	cubique
	Il est extrêmement rare de trouver des inclusions d'or dans des cristaux de quartz bien formés et limpides (Hyrsl & Niedermayr, 2003). En revanche, on peut trouver couramment des veines d'or associées à du quartz laiteux, notamment dans le Queensland en Australie. Mariposa County, Californie, USA; Région de Napf, Suisse; Queensland, Australie. <i>Figure 9 : Inclusion d'or, Australie. Photo de A. Tuma. Source : www.mindat.org</i>	

SULFURES ET SULFOSELS

Arsénopyrite	FeAsS	monoclinique
	Quelques localités produisent des quartz à inclusions d'arsénopyrite, celle de Panasqueira au Portugal (mine de tungstène) étant la plus connue. L'arsénopyrite est difficilement identifiable sans moyen de laboratoire et peut être confondue avec la marcassite, la galène et la pyrrhotite (Hyrsl & Niedermayr, 2003). Panasqueira, Beira Baixa, Portugal; Yao Gang Xian, Hunan, Chine. <i>Figure 10 : Cristal d'arsénopyrite (1 mm), Sauerland, Allemagne. Photo de J. Hyrsl.</i>	
Bismuthinite	Bi ₂ S ₃	orthorhombique
	L'inclusion de bismuthinite est plus courante dans le quartz rose, mais on en trouve également dans le cristal de roche, elle peut être confondue avec la cosalite. Inclusion à l'aspect irrégulier, grise à noire et à l'éclat métallique. Madagascar est une des localités de quartz à bismuthinite issu de pegmatite, les autres spécimens étant identifiés dans les mines de tungstène ou les fissures alpines (Hyrsl & Danet, 2005). Mahaiza, Madagascar; Kara Oba, Kazakhstan; Wannigletscher, Binntal, Suisse. <i>Figure 11 : Inclusion de bismuthinite (3 mm) dans un quartz rose de Madagascar. Photo de J. Hyrsl.</i>	

Chalcopryrite	CuFeS_2	quadratique
	<p>Rares sont les cristaux de chalcopryrite bien formés de couleur jaune laiton à l'éclat métallique. Certaines localités citées plus bas ont produit de beaux spécimens prismatiques. Les inclusions sont souvent associées à de la pyrrotite ou de la galène avec des formes irrégulières ou des fantômes (Hyrsi & Niedermayr, 2003). Panasqueira, Beira Baixa, Portugal; Gairo, Tanzanie; Joaquim, Felicio, Brésil.</p> <p><i>Figure 12 : Cristal de chalcopryrite dans le quartz. Photo de J. Hyrsi.</i></p>	
Cinabre	HgS	rhomboédrique
	<p>Le cinabre est une espèce minérale composée de sulfure de mercure à la couleur rouge vif. C'est une inclusion rare dans le quartz, quelques spécimens proviennent de Chine (Hyrsi & Niedermayr, 2003). Un quartz "fraise" en provenance du Kazakhstan et analysé à Nantes a révélé de petites inclusions aciculaires de cinabre orientées dans quatre directions et à l'origine de l'effet de chatoyance (Pradat et al., 2011). Guizhou, Chine; Kazakhstan.</p> <p><i>Figure 13 : Aiguilles de cinabre. Photo de B. Rondeau.</i></p>	
Cosalite	$\text{Pb}_2\text{Bi}_2\text{S}_5$	orthorhombique
	<p>La meilleure localité de quartz à cosalite située au Kazakhstan a fermé il y a quelques années (Hyrsi & Niedermayr, 2003). Les inclusions présentent un faciès aciculaire plat à l'éclat métallique, argent à noir. Souvent associées à la bismuthinite dans les mines de tungstène, ces deux inclusions ne peuvent être différenciées que par des outils de laboratoire. Kara Oba, Kazakhstan; Pripolarnyj, Oural, Russie.</p> <p><i>Figure 14 : Inclusions de cosalite. Photo de R. Lavinsky. Source : www.mindat.org</i></p>	
Covellite	CuS	hexagonal
	<p>Le Minas Gerais au Brésil est la seule localité connue à produire du quartz à inclusions de covellite, un sulfure de cuivre. Les inclusions se présentent sous forme de plaquettes hexagonales roses à violettes. Elles peuvent produire de l'iridescence ou effet Schiller dans le quartz lorsqu'elles sont en quantité suffisante (Quinn, 2005). Bahia, Brésil.</p> <p><i>Figure 15 : Plaquettes de covellite. Photo de E. P. Quinn</i></p>	
Galène	PbS	cubique
	<p>L'inclusion la plus rare de galène dans le quartz a été trouvée au mont Ida USA, les cristaux inclus étaient cubiques et parfaitement formés malgré des clivages parfaits. Généralement, la galène se présente en agrégat de toute petite dimension et dénué de forme géométrique (Hyrsi & Niedermayr, 2003). Kara Oba, Kazakhstan; Mont Ida, Arkansas, USA.</p> <p><i>Figure 16 : Inclusions de galène. Source photo : www.johnbetts-fineminerals.com</i></p>	
Gersdorffite	NiAsS	cubique
	<p>Les plus belles inclusions de gersdorffite ont été trouvées dans la région de l'Oural en Russie. Elles présentent un habitus octaédrique à l'éclat métallique. Elles sont généralement de petites dimensions 2 à 3 mm. D'autres localités produisent des quartz à gersdorffite associés avec de la cobaltite, notamment en Suisse (Hyrsi & Niedermayr, 2003). Magnitogorsk, Oural, Russie; Furkabasis tunnel, Suisse.</p> <p><i>Figure 17 : Cristaux de gersdorffite, Oural Russie. Photo de I. Savin. Source : www.mindat.org</i></p>	
Izoklakeite	$\text{Pb}_{27}(\text{Cu Fe})_2(\text{Sb Bi})_{19}\text{S}_{57}$	orthorhombique
	<p>C'est un sulfosel de plomb, d'antimoine et de bismuth, il comporte du cuivre dans sa composition chimique. Les inclusions se présentent sous forme d'agrégat de cristaux aciculaires gris-plomb, elles sont visuellement assez similaires à celles de la jamesonite (Rossman & Kampf, 2011). Graubünden, Suisse.</p> <p><i>Figure 18 : Aiguilles d'izoklakeite. Photo de G.R Rossman.</i></p>	
Jamesonite	$\text{Pb}_4\text{FeSb}_6\text{S}_{14}$	monoclinique
	<p>C'est un sulfure de plomb et d'antimoine se développant à basse température. Les enchevêtrements d'aiguilles aciculaires sont généralement noirs à gris plomb. La mine de Yao Gang Xian en Chine produit des quartz, mais également des fluorites à inclusions de jamesonite (Hyrsi & Niedermayr, 2003). Minas Gerais, Brésil; Yao Gang Xian, Hunan, Chine.</p> <p><i>Figure 19 : Aiguilles de jamesonite. Photo de T. Pradat. Source : www.gemmo.eu</i></p>	

Kobellite	$Pb_{11}(Cu\ Fe)_2(Bi\ Sb)_{15}S_{35}$	orthorhombique
	<p>Ce minéral est un sulfure d'antimoine, de bismuth et de plomb. La kobellite et la giessenite sont chimiquement proches et du même système cristallin, orthorhombique. En inclusion dans le quartz, on peut les différencier par leur habitus. Les inclusions de kobellite se caractérisent par de longues aiguilles flexibles et bouclées (Gübelin & Koivula, 2005). Emerald Lake, Yukon, Canada.</p> <p><i>Figure 20 : Aiguilles de kobellite. Photo de J. Koivula.</i></p>	
Marcassite	FeS_2	orthorhombique
	<p>La marcassite est le polymorphe orthorhombique de la pyrite. En inclusion dans le quartz, on peut la différencier visuellement par sa couleur jaune laiton clair avec des reflets verdâtres et par sa forme lamellaire et discoïdale. C'est également une inclusion fréquente du quartz rose. Des cristaux de marcassite ont été identifiés par analyse XRD dans des quartz provenant d'une mine de tungstène en Bolivie (Hyrsi & Niedermayr, 2003). Bolivie, Brésil, Madagascar.</p> <p><i>Figure 21 : Feuille de marcassite. Photo de T. Pradat. Source : www.gemmo.eu</i></p>	
Ménéghinite	$Pb_{13}CuSb_7S_{24}$	orthorhombique
	<p>La ménéghinite est un sulfosel d'antimoine, de plomb et de cuivre. On trouve des quartz à ménéghinite dans les fentes alpines, le massif de la Lauzière en Savoie est réputé pour ses beaux spécimens. Ces inclusions relativement rares se présentent en aiguilles aciculaires assez courbées noires à brun clair (Messer & Moelo, 2000). Entre 2 roches, massif de la Lauzière, Savoie, France; Oural, Russie.</p> <p><i>Figure 22 : Inclusions de ménéghinite, Savoie. Photo de D. Journet. Source : www.micromineral.org</i></p>	
Molybdénite	MoS_2	hexagonal
	<p>Les inclusions dans le quartz de ce sulfure de molybdène sont généralement bien formées. Les cristaux gris foncé à noir ont plutôt un habitus tabulaire ou lamellaire et peuvent se reconnaître à leur symétrie hexagonale (Koivula & Tannous, 2004b). Valparaiso, Chili, Pérou.</p> <p><i>Figure 23 : Concentration de cristaux de molybdénite. Photo de E. Gavrilenko. Source : www.gem-sphalerite.com</i></p>	
Pääkkönenite	Sb_2AsS_2	
	<p>La pääkkönenite est un rare sulfure d'antimoine et d'arsenic. Cette inclusion rarissime dans le quartz a été découverte dans une pegmatite de Californie. Elle se présente sous forme d'aiguille gris sombre à l'éclat métallique (Laur, 2004). Mine Cryo-Genie, San Diego, Californie, USA.</p> <p><i>Figure 24 : Aiguille de pääkkönenite. Photo de M. Tannous.</i></p>	
Pyrite	FeS_2	cubique
	<p>La pyrite est un sulfure de fer de système cristallin cubique. Les inclusions de cristaux de pyrite peuvent présenter un habitus octaédrique ou dodécaédrique (pyritoédrique) à la couleur jaune laiton et à l'éclat métallique. Plus rarement sous forme de concrétions discoïdales "pyrite-dollars" (Johnson & Koivula 1997). On peut rencontrer occasionnellement des cristaux maclés, maclé de la croix de fer typique de la pyrite. Minas Gerais, Brésil; Oural, Russie.</p> <p><i>Figure 25 : Cristaux der pyrite. Photo de E. Gavrilenko. Source : www.gem-sphalerite.com</i></p>	
Sphalérite	$(Zn\ Fe)S$	cubique
	<p>La sphalérite peut-être reconnaissable par ses feux (dispersion 0.156), son éclat élevé et sa symétrie cubique pour les cristaux bien formés. Les inclusions de couleur jaune ou orange sont plus rares dans le quartz (Gübelin & Koivula, 2005). Généralement les cristaux de sphalérite inclus dans le quartz sont noirs et opaques (Hyrsi & Niedermayr, 2003). Brésil; Kara Oba, Kazakhstan; British Columbia, Canada.</p> <p><i>Figure 26 : Cristal de sphalérite, Canada. Photo de J. Koivula.</i></p>	

HALOGÉNURES

Fluorite	CaF ₂	cubique
----------	------------------	---------

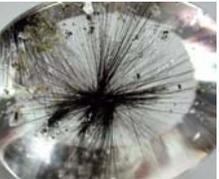

 Le quartz à fluorite bleue a été découvert à Madagascar dans une mine proche du village de Amborompotsy. Les cristaux de forme cubique ou octaédrique sont généralement parfaitement formés (Koivula et al., 2005). Dans l'améthyste, la fluorite a une forme plus ou moins sphéroïde, elle prend l'apparence de nodule blanc neige à la structure fibreuse et radiale (Gübelin & Koivula, 2005).
 Amborompotsy, Madagascar; Artigas, Uruguay
 Figure 27 : Octaèdre de fluorite. Photo de J. Koivula.

OXYDES ET HYDROXYDES

Anatase	TiO ₂	quadratique
---------	------------------	-------------


 L'anatase est un polymorphe de TiO₂ au même titre que le rutile ou la brookite, son système cristallin est quadratique comme le rutile mais il se forme à des températures plus basses. Les faciès des cristaux peuvent varier de la bipyramide quadratique à l'habitus tabulaire. Ils sont généralement bleu foncé, mais peuvent être aussi brun à jaune orangé. L'association anatase rutile au sein d'un même cristal n'est pas rare (Hyrsi & Niedermayr, 2003).
 Bahia, Brésil; Hardangervidda, Norvège; Oural, Russie.
 Figure 28 : Inclusion d'anatase bleue. Photo de K. Larsen. Source : Smithsonian NMNH

Ankangite	Ba(Ti,V ³⁺ ,Cr ³⁺) ₈ O ₁₆	quadratique
-----------	--	-------------


 L'ankangite est un oxyde de baryum rare. Il a été découvert en inclusion dans le quartz à Teofilo Otoni au Brésil. Dans le quartz, l'ankangite prend l'aspect de l'oursin et il est souvent associé à la celsiane, un autre minéral riche en baryum, mais du groupe des feldspaths (Macri et al., 2009).
 Teofilo Otoni, Brésil.
 Figure 29 : inclusion d'ankangite et cristaux de celsiane. Photo de M. Pantò.

Brookite	TiO ₂	orthorhombique
----------	------------------	----------------


 La brookite est le polymorphe orthorhombique du rutile et de l'anatase. Ses conditions de formation se situent entre celles des deux autres polymorphes de TiO₂. L'inclusion type est arrangée en épitaxie, les aiguilles de rutile étant perpendiculaires à une lame de brookite (Koivula & Tannous, 2003b). "Platinum quartz" est l'appellation donnée par les brésiliens à ce quartz.
 Curvelo, Minas Gerais, Brésil.
 Figure 30 : Inclusion en peigne. Photo de J. Koivula.

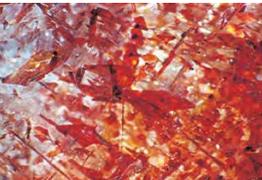
Cristobalite	SiO ₂	quadratique
--------------	------------------	-------------


 C'est un polymorphe de SiO₂, la cristobalite cristallise à une température supérieure au quartz, à environ 1470°C, mais la forme basse température existe aussi. C'est une inclusion rare de l'améthyste, elle se présente sous forme de nodules fibreux et brun jaunâtre. Dans certaines améthystes de l'Uruguay, il apparaîtrait que la fluorite et la cristobalite cristallisent en concrétion (Gübelin & Koivula, 2005).
 Artigas, Uruguay; Colorado, USA.
 Figure 31 : Concrétions de cristobalite, Uruguay. Photo de J. Gübelin.

Goethite	Fe ³⁺ O(OH)	orthorhombique
----------	------------------------	----------------


 La goethite est un oxy-hydroxyde de fer jaune qui se forme soit par altération de minéraux riches en fer soit par recristallisation progressive de la ferrihydrite. En inclusion dans l'améthyste, la goethite prend l'aspect d'un balai en paille de riz, rarement isolée, elle se forme en bouquet. Lors de certaines modifications de condition de croissance, la goethite peut se transformer en hématite rouge, l'extrémité des aiguilles en brosse deviendra noire (Gübelin & Koivula, 2005).
 Rio Grande do Sul, Brésil; Artigas, Uruguay.
 Figure 32 : brosse de goethite. Photo de T. Pradat. Source : www.gemmo.eu

Hématite	Fe ₂ O ₃	rhomboédrique
----------	--------------------------------	---------------


 L'hématite est un oxyde de fer rouge, une inclusion courante du cristal de roche et de l'améthyste. On peut la rencontrer sous divers habitus, soit en plaquettes pseudo-hexagonales rouge à orange vif "Strawberry quartz" (Koivula et al., 2004), en aiguilles ou filaments tortueux difficilement discernables de la lépidocrocite, soit en concrétion, cristallisation en couche concentrique (Hyrsi & Niedermayr, 2003).
 Coxo mine, Bahia, Brésil; Orange River, Namibie; Chemkent, Kazakhstan.
 Figure 33 : Plaquettes d'hématite. Photo de J. Koivula.

Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	rhomboédrique
----------	------------------------------	---------------



La dolomite est une espèce minérale composée de carbonate de calcium et de magnésium. Cette inclusion a été décrite par J. Koivula dans le photoatlas (vol 2). Il montre des cristaux rhomboédriques automorphes avec de belles faces cristallines planes (Sri Lanka). L'association dolomite, aiguilles de rutile serait courante pour les pierres originaires du Brésil. (Gübelin & Koivula, 2005).
Minas Gerais, Brésil; Kuruwita, Sri Lanka.

Figure 41 : Dolomite et rutile, Brésil. Photo de T. Pradat. Source : www.gemmo.eu

Rhodochrosite	MnCO_3	rhomboédrique
---------------	-----------------	---------------



La rhodochrosite est une inclusion peu commune du quartz. Un spécimen du Brésil comporterait des inclusions solides de rhodochrosite en grains irréguliers (Hyrsl & Niedermayr, 2003). Dans une pierre de provenance inconnue, l'inclusion serait de forme plus ou moins sphéroïde, rose pâle, associée à de petits cristaux noirs de pyrrhotite (Koivula et al., 2001). Gibraltar mine, Naïca, Mexique; Pederneira, Minas Gerais, Brésil.

Figure 42 : Rhodochrosite rose pâle (3 mm) et pyrrhotite. Photo de J. Koivula.

Sidérite	$\text{Fe}^{2+}\text{CO}_3$	rhomboédrique
----------	-----------------------------	---------------



Ce dernier carbonate rhomboédrique est rarement inclus dans le quartz, il se présente plus en surface ou en croissance parallèle. Une analyse XRD a confirmé une inclusion de sidérite botryoïdale avec une couleur blanche inattendue dans un quartz originaire de Suisse, canton du Tessin (Hyrsl & Niedermayr, 2003).
Panasqueira, Portugal; Tessin, Suisse.

Figure 43 : Quartz à inclusions de rutile et sidérite, Brésil. Source : www.minfind.com

BORATES

Hambergite	$\text{Be}_2\text{Bo}_3(\text{OH})$	orthorhombique
------------	-------------------------------------	----------------



L'Hambergite est un borate de béryllium. Une pegmatite dans la région du Baïkal en Russie est connue pour ces cristaux limpides de quartz fumé à inclusions d'hambergite. Les cristaux inclus sont incolores, striés et parfois à double terminaison (Hyrsl & Niedermayr, 2003). Baïkal, Russie; Turakuloma Range, Tadjikistan; Californie, USA.

Figure 44 : Quartz à inclusions d'hambergite, Californie, USA. Photo de R. Lavinsky. Source : www.commons.wikimedia.org

SULFATES

Anhydrite	$\text{Ca}(\text{SO}_4)$	orthorhombique
-----------	--------------------------	----------------



L'anhydrite est le sulfate de calcium. Les inclusions forment de longs tubes à la section plus ou moins rectangulaire, ils sont souvent enchevêtrés les uns dans les autres. Hyrsl & Niedermayr (2003) mentionnent que la plupart de ces tubes sont généralement vides. Lubudi, Congo; Poretta, Italie; Kharan, Balochistan, Pakistan; Val Tavetsch, Suisse.

Figure 45 : Inclusions d'anhydrite. Source : www.danweinrich.com

Baryte	BaSO_4	orthorhombique
--------	-----------------	----------------



La baryte est un sulfate de baryum. Rykart (1995) a été le premier à mentionné la baryte en inclusion dans des quartz en provenance de Vals en Suisse. Des quartz d'Autriche contenant des inclusions blanches longtemps décrites comme étant de l'anhydrite ont été analysés par EDS. La présence de baryte a été confirmée (Hyrsl & Niedermayr, 2003). Werfen, Autriche; Alpes d'Huez, France; Vals, Suisse.

Figure 46 : Inclusions de baryte, Alpes d'Huez, France. Source : <http://alpes.escapades.free.fr/>

PHOSPHATES, ARSÉNIATES, VANADATES

Apatite	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F Cl OH})$	hexagonal
---------	--	-----------

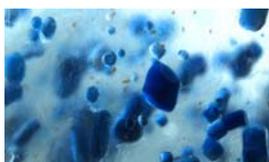


Phosphate de calcium, l'apatite fut identifiée dans un quartz fumé originaire de Suisse par Mullis (1995). Des quartz contenant des cristaux d'apatite bleue ont été découverts dans de nombreuses pegmatites brésiliennes. Ils ont été identifiés comme étant de la fluorapatite (Hyrsl & Niedermayr, 2003).

Mine Pederneira et pegmatite Jaguaracu, Minas Gerais, Brésil.

Figure 47 : Cristaux d'apatite bleue, grossissement 25x. Photo de J. Koivula

Lazulite	$(\text{Mg Fe}) \text{Al}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2$	monoclinique
----------	--	--------------



Ce type de quartz a été découvert dans la région de Mahaiza à Madagascar. Une profusion de petits grains (1mm) bleus foncés plus ou moins sphéroïdes serait apparemment à l'origine de la couleur bleue (Fritsch & Lasnier, 1997). Des grains de lazulite-scorzalite fortement pléochroïque ont été identifiés en Bolivie (Hyrsl & Niedermayr, 2003).
Mahaiza, Madagascar; Kami tungstène mine, Bolivie.

Figure 48 : Inclusions de lazulite, Madagascar. Photo de J. Koivula.

Lithiophilite	$\text{Li Mn}^{2+} \text{PO}_4$	orthorhombique
---------------	---------------------------------	----------------



La lithiophilite est un minéral du groupe des phosphates composé de lithium, appartenant au groupe de la triphylite avec lequel il forme une série isomorphe. Les inclusions se présentent sous forme d'aiguilles ou plus souvent de lamelles (faciès plat) et de couleur brune, beige à jaune. Elles peuvent être confondues avec la biotite un minéral du groupe des micas. (Hyrsl & Niedermayr, 2003).
Brésil, Madagascar.

Figure 49 : Aiguilles de lithiophilite. Photo T. Pradat. Source : www.gems-plus.com

Monazite-(Ce)	$(\text{Ce,La,Nd,Th}) (\text{PO}_4)$	monoclinique
---------------	--------------------------------------	--------------



La monazite est un phosphate de cérium, lanthane, yttrium et thorium. Son haut indice de réfraction lui confère un éclat sub-adamantin. Particularité de cette inclusion, un changement de couleur prononcé, causé manifestement par la présence de terres rares dans sa composition chimique (Hyrsl & Niedermayr, 2003).
Monts Oural, Russie; Llallagua, Potosi, Bolivie.

Figure 50 : Lapcha mine, Russie. Photo de J. Hyrsl.

Triphylite	$\text{Li Fe}^{2+} \text{PO}_4$	orthorhombique
------------	---------------------------------	----------------



La triphylite en inclusion dans le quartz a été décrite par Hyrsl (2003). L'inclusion a un habitus pyramidal avec une section transversale en forme de losange. Elle se caractérise aussi par un clivage perpendiculaire à l'allongement du cristal. Un changement de couleur est visible (vert pâle à lumière du jour/ rouge sous une lampe).
Governador Valadares, Brésil.

Figure 51 : Inclusion de triphylite (8 mm). Photo de J. Hyrsl.

Trolléite	$\text{Al}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH})_3$	monoclinique
-----------	---	--------------



Présentée au salon de Tucson en 2011, la trolléite est l'autre phosphate pouvant être à l'origine de la couleur bleue dans le quartz, mais parfois elle peut être aussi violacée. Des spécimens provenant de Teofilo Otoni, Brésil ont été étudiés à l'institut de géologie de Rome, les inclusions ont été identifiées comme étant de la trolléite associée à de la lazulite (Macri et al., 2011).
Brésil.

Figure 52 : Inclusion de trolléite, Brésil. Photo T. Pradat. Source : www.gemmo.eu

SILICATES Groupe des amphiboles

Actinolite	$\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5 (\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$	monoclinique
------------	---	--------------



Les amphiboles sont une famille de minéraux dont les espèces sont difficiles à distinguer les unes des autres (ex : actinolite/trémolite). Les inclusions d'actinolite présentent un habitus aciculaire, les aiguilles de couleur verte sont généralement orientées aléatoirement. C'est une inclusion courante du quartz que l'on retrouve dans de nombreuses localités (Hyrsl & Niedermayr, 2003)..

Brésil, France, Madagascar, Pakistan, Suisse...

Figure 53 : Quartz à actinolite, Afrique. Photo T. Pradat. Source : www.gems-plus.com

Riebeckite	$\text{Na}_2(\text{Fe}_3^{2+}, \text{Fe}_2^{3+})\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	monoclinique
------------	--	--------------



Riebeckite ou crocidolite appartient au groupe des amphiboles sodiques. Parmi les variétés polycristallines du quartz, l'œil de tigre résulte du remplacement de crocidolite bleue par du quartz qui garde l'aspect fibreux de l'asbeste. Plus rarement, certaines localités produisent du cristal de roche à inclusions de riebeckite sous forme de fibres ou de fantômes (Hyrsl & Niedermayr, 2003). Ces inclusions peuvent être confondues avec la papagoïte ou l'ajoïte.

Figure 54 : Quartz à inclusions de riebeckite, Inde. Photo de J. Hyrsl.

SILICATES Groupe des béryls

Émeraude	$\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	hexagonal
----------	--	-----------



Les inclusions d'émeraude dans le quartz peuvent prendre différentes formes. La plus surprenante est un faciès aciculaire avec des plans de séparation basale rappelant les inclusions d'actinolite de type bambou de l'émeraude. À Muzo en Colombie, les cristaux inclus de type protogénétique sont formés et proches de la surface du cristal hôte. La coupe transversale est caractéristique de la symétrie hexagonale (Choudhary, 2011b). Nova Era et Belo Horizonte, Brésil; La Pita, Colombie.

Figure 55 : Coupe transversale hexagonale. Photo de G. Choudhary.

SILICATES Groupe des chlorites

Chlorite généralités



Le quartz à inclusion de chlorite est relativement fréquent dans les fentes alpines. De couleur vert bouteille à vert-brunâtre, ces inclusions se présentent sous forme de fantôme révélant la forme cristalline du cristal hôte ou sous forme de chevrons lorsque les lignes ou les zones de croissance ont un angle de 120° (Hyrsl & Niedermayr, 2003). Brésil, France, Grèce, Madagascar, Suisse...

Figure 56 : Quartz à inclusions de chlorite. Photo de J. Koivula

Chamosite	$(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{O})_8$	monoclinique
-----------	--	--------------



Les cristaux de chamosite sont une variété de chlorite riche en fer. Inclus dans le quartz, ils se caractérisent par leur habitus tabulaire de section plus ou moins hexagonale et sont curieusement traversés par des aiguilles de tourmaline schörl (Mazziotti-Tagliani et al., 2010). Nommé "Churrasco quartz" pour leur apparence visuelle rappelant les brochettes brésiliennes. Chapada Diamantina, Bahia, Brésil.

Figure 57 : Chamosite et aiguille de tourmaline. Photo de M. Macri

Clinochlore	$\text{Mg}_5\text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	monoclinique
-------------	--	--------------



Les fantômes de clinochlore inclus dans le quartz se rencontrent fréquemment dans les fentes alpines. On peut trouver également au Brésil, un autre type d'habitus, une forme pseudo-hexagonale avec un noyau concentrique d'où partent des fibres de couleur verte (Gübelin & Koivula, 2005). Les inclusions sont souvent proches de la surface du cristal et ressemblent à des nénuphars.

Minas Gerais, Brésil.

Figure 58 : Inclusions de clinochlore. Photo de K. Larsen. Source : Smithsonian NMNH

Cookéite	$(\text{Al}, \text{Li})_3\text{Al}_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	monoclinique
----------	---	--------------



La cookéite est une chlorite lithinifère. En inclusion dans le quartz, elle se caractérise par un faciès sphéroïde et se présente en amas de boules fibreuses à la couleur vert pâle. De beaux spécimens ont été trouvés en Arkansas, USA, ces quartz contenaient de la cookéite bleuâtre (Hyrsl & Niedermayr, 2003).

Salzbourg, Autriche; Minas Gerais, Brésil; Arkansas, USA.

Figure 59 : Inclusions de cookéite, Brésil. Photo de T. Pradat Source : www.gemmo.eu

SILICATES Groupe des feldspaths

Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	triclinique
--------	-----------------------------	-------------



On peut trouver plusieurs types de feldspath dans le quartz. Quand l'albite est incolore, l'observation est difficile, car le quartz a un indice de réfraction proche du feldspath (Hyrsl & Niedermayr, 2003), elle est surtout visible entre polariseurs croisés. Un autre critère d'identification peut être la macle polysynthétique caractérisant le plagioclase.

La cleavelandite est une albite blanche que l'on peut rencontrer dans le quartz, mais cette inclusion reste encore à étudier.

Minas Gerais, Brésil; Pakistan; Kuruwita, Sri Lanka.

Figure 60 : Quartz à inclusions d'albite. Photo de J. Koivula.

SILICATES Groupe des grenats

Spessartite	$Mn_3Al_2(SiO_4)_3$	cubique
	<p>Les inclusions de grenat dans le quartz sont très recherchées des collectionneurs. Ont été identifiés à ce jour dans le cristal de roche, les grenats spessartite et almandin, l'hessonite et l'andradite aux États-Unis. Ces inclusions automorphes peuvent avoir un habitus icosaédrique (Hyrs & Niedermayr, 2003).</p> <p>Koivula et Tannous (2003) ont identifié par spectrométrie Raman des cristaux de spessartite dans du quartz rose en provenance du Sri Lanka. Koivula mentionne également des cristaux rouge foncé de spessartite inclus dans de la citrine au Brésil.</p> <p><i>Figure 61 : Cristaux de spessartite. Photo de L. Barbosa.</i></p>	
	<p>Après le Sri Lanka, du quartz rose a été découvert en 2007 à Madagascar comportant des inclusions de diopside et de grenat grossulaire orange. C'était la première fois qu'une telle combinaison d'inclusions était observée dans du quartz rose (Koivula & Chadwick, 2008). Brésil, Bulgarie, Myanmar, Sri Lanka, USA...</p> <p><i>Figure 62 : Quartz rose à inclusions de spessartite et ilménite. Photo de M. Tannous.</i></p>	

SILICATES Groupe des micas

Biotite	$K(Mg Fe^{2+})_3(Al Fe^{3+})Si_3O_{10}(OH,F)_2$	monoclinique
	<p>La biotite est une inclusion courante du quartz. On la rencontre sous forme de cristaux aplatis de type lamellaire. Ce type de mica présente souvent une structure foliacée et un habitus pseudo-hexagonal (Gübelin & Koivula, 2005). Ces lamelles peuvent être jaunes à brunes et se caractérisent aussi par un fort éclat pseudo-métallique.</p> <p>Brésil.</p> <p><i>Figure 63 : Inclusions de biotite. Photo de E. Gavrilenko. Source : www.gem-sphalerite.com</i></p>	
Céladonite	$K(Mg Fe^{2+})(Al Fe^{3+})Si_4O_{10}(OH)_2$	monoclinique
	<p>La muscovite, minéral commun du groupe des micas forme une série isomorphe avec la céladonite et la paragonite principalement. Les inclusions se présentent sous forme de fantôme de croissance vert clair, mais à ce jour aucune étude n'est venue confirmer la nature exacte du mica (muscovite ou céladonite).</p> <p>Ambatofinandrahana, Madagascar.</p> <p><i>Figure 64 : Inclusions de céladonite, Madagascar. Source : www.thegemtrader.com</i></p>	
Fuchsite	$K(Al Cr)_3 Si_3O_{10}(OH)_2$	monoclinique
	<p>La fuchsite est la variété chromifère de la muscovite. Quartz aventuriné est l'appellation commerciale de cette quartzite vert vif contenant des plaquettes pseudo-hexagonales en quantité plus ou moins importante à l'effet pailleté caractéristique (GEM-A, 2011). Gübelin & Koivula (2005) ont décrit des cristaux sphéroïdes isolés ou réunis en grappe dans un quartz de Madagascar.</p> <p>Inde, Madagascar, Russie, Sri Lanka.</p> <p><i>Figure 65 : Inclusions de mica chromifère. Photo de T. Pradat. Source : www.gems-plus.com</i></p>	

SILICATES Groupe des pyroxènes

Aegirine	$NaFe^{3+}(Si_2O_6)$	monoclinique
	<p>L'aegirine appartient à la famille des pyroxènes, plus précisément aux clinopyroxènes sodiques. La région de Zomba au Malawi est réputée pour les cristaux de quartz à inclusions d'aegirine noire. La plupart des cristaux ont un habitus prismatique et sont striés longitudinalement. Plus rarement les cristaux peuvent montrer un faciès allongé en agrégat fibro-radié vert, gris-vert (Hyrs & Niedermayr, 2003).</p> <p>Zomba, Malawi; Pakistan.</p> <p><i>Figure 66 : Nombreuses inclusions d'aegirine, Malawi. Source : www.johnbetts-fineminerals.com</i></p>	
Hédenbergite	$CaFe(Si_2O_6)$	monoclinique
	<p>L'hédenbergite est un clinopyroxène ferrique. Cette inclusion est souvent mentionnée dans le quartz vert en provenance de Grèce, d'Italie et d'Allemagne (Rykart, 1995).</p> <p>Des échantillons auraient été analysés par diffraction des rayons X, seules des inclusions d'amphiboles de type actinolite furent diagnostiquées. La présence d'hédenbergite causant la couleur verte dans le quartz reste à prouver (Hyrs & Niedermayr, 2003).</p> <p>Breitenbrunn, Allemagne; île de Séfiros, Grèce; île d'Elbe, Italie.</p> <p><i>Figure 67 : Quartz de Séfiros, Grèce. Photo de T. Pradat. Source : www.gemmo.eu</i></p>	

Diopside généralités



Le diopside forme une série avec l'hédenbergite, la frontière entre les deux est relativement ténue, les ions de Mg peuvent se substituer aux ions Fe (Gübelin & Koivula, 2005). Le diopside est une inclusion relativement fréquente du quartz rose. Généralement de couleur vert à vert foncé, les cristaux peuvent présenter un habitus prismatique pseudo-quadratique ou tabulaire, des stries selon un clivage distinct dans 2 directions presque à 90°.

Madagascar, Sri Lanka.

Figure 68 : Cristaux de diopside dans quartz rose, Madagascar. Photo de J. Koivula.

Violane

(Ca Mg Mn) SiO₃

monoclinique



C'est une inclusion rare du quartz. Ce clinopyroxène est une variété de diopside riche en manganèse. Les inclusions de violane dans le quartz ont été trouvées pour le moment, uniquement dans le Piémont en Italie. Les cristaux se présentent sous forme de taches violettes à bleues au faciès lamellaire à fibreux (Macri et al., 2007).

Praborna mine, vallée d'Aoste, Italie.

Figure 69 : Cabochon de quartz à inclusions de violane (12 cts). Photo de M. Macri.

SILICATES Groupe des tourmalines

Elbaïte indicolite

Na(Al Li)₃Al₆(Si₆O₁₈)(BO₃)₃(OH)₄

rhomboédrique



L'elbaïte variété indicolite fait partie des inclusions qui sont à l'origine de la couleur bleue du quartz. Les cristaux sont nombreux, longs, droits, épais et/ou minces disposés aléatoirement dans le cristal hôte. L'indicolite présente un fort dichroïsme allant de l'incolore au bleu foncé (Koivula & Tannous, 2003), mais d'autres minéraux aussi, la lazulite par exemple et la dumortière. Le Brésil fournit de même, des quartz à inclusions d'elbaïte cuprifère "Paraíba" dans du quartz laiteux, mais ces spécimens sont rares et hors de prix.

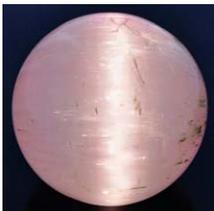
Morro Redondo mine, Araçuaí, Brésil.

Figure 70 : inclusions d'indicolite, grossissement 10x. Photo de J. Koivula.

Elbaïte rose

Na(Al Li)₃Al₆(Si₆O₁₈)(BO₃)₃(OH)₄

rhomboédrique



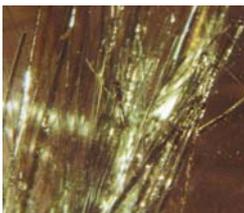
Exceptionnellement des inclusions de tourmaline peuvent être à l'origine de la couleur rose du quartz. La particularité de ce spécimen est de contenir des aiguilles longues et coplanaires qui produisent un effet œil de chat. La section transversale présente une coupe rhomboédrique. Les différentes analyses spectrométriques sont venues confirmer ce diagnostic (Choudhary, 2011a).

Figure 71 : Quartz à inclusion d'elbaïte rose. Photo de G. Choudhary.

Elbaïte verdélite

Na(Al Li)₃Al₆(Si₆O₁₈)(BO₃)₃(OH)₄

rhomboédrique



Ces inclusions de tourmaline verdélite proviennent souvent des pegmatites du Minas Gerais. Les cristaux présentent couramment un habitus prismatique au faciès aciculaire, avec un dichroïsme souvent prononcé (Hyrs & Niedermayr, 2003).

Certains cristaux en aiguilles peuvent révéler d'autres morphologies tel que des faisceaux, notamment au Sri Lanka (Gübelin & Koivula, 2005).

Brésil, Sri Lanka.

Figure 72 : Inclusion de tourmaline verdélite. Photo de J. Koivula

Tourmaline noire

NaFe₃Al₆(BO₃)₃(Si₆O₁₈)(OH)₄

rhomboédrique



Appelée également schörl, c'est l'espèce noire et opaque du groupe de la tourmaline, elle est riche en fer. C'est une inclusion commune du quartz, les cristaux présentent un habitus prismatique, ils sont souvent longs et assez striés. La coupe transversale montre un contour triangulaire aux faces plus ou moins convexes rappelant le système cristallin rhomboédrique (Gübelin & Koivula, 2005).

Brésil, Madagascar.

Figure 73 : Inclusions de tourmaline schörl. Photo de T. Pradat. Source : www.gemmo.eu

LES AUTRES SILICATES

Ajoïte

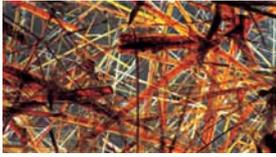
(K Na) Cu₇AlSi₉O₂₄(OH)₆ 3H₂O

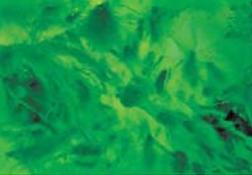
triclinique



La célèbre mine de Messina en Afrique du Sud est réputée pour ces quartz à inclusions de cristaux cuprifères. La couleur bleu turquoise est obtenue par la présence de nombreuses fibres souples disposées de façon aléatoire dans le cristal hôte ou sous forme de fantôme (Koivula et al., 2004).

Figure 74 : Prisme de quartz à inclusions d'ajoïte, Afrique du Sud. Photo de T. Pradat. Source : www.gemmo.eu

Astrophyllite	$(K Na)_3(Fe Mn)_7Ti_2Si_8O_{24}(O OH)_7$	triclinique
	<p>C'est un silicate que l'on rencontre dans les roches magmatiques de type syénite pauvre en silice, la présence d'inclusion d'astrophyllite dans le quartz est de ce fait une curiosité (Hyrs & Niedermayr, 2003).</p> <p>Les cristaux se présentent en enchevêtrement d'aiguilles rappelant le rutile. La couleur varie du brun foncé, bronze à jaune orangé (Koivula & Tannous, 2003d).</p> <p>Pakistan; Kola, Russie.</p> <p><i>Figure 75 : Aiguilles d'astrophyllite, grossissement 10x. Photo de J. Koivula.</i></p>	
Charoïte	$K(Ca Na)_2(Si_4O_{10})(OH,F)H_2O$	monoclinique
	<p>La charoïte est une espèce minérale silicatée découverte en Russie. Sa structure est extrêmement fibreuse et c'est sous cette forme qu'on la rencontre dans le quartz. Les filaments courbes et entrelacés à la couleur mauve sont caractéristiques. Le cristal hôte est majoritairement du quartz associé dans une moindre mesure à du feldspath (Koivula & Tannous, 2002).</p> <p><i>Figure 76 : Quartz à inclusions de charoïte, Russie. Photo de T. Pradat. Source : www.gemmo.eu</i></p>	
Chrysocolle	$(CuAl)_2H_2Si_2O_5(OH)$	orthorhombique
	<p>Le chrysocolle est un silicate de cuivre hydroxylé. Il se présente généralement en agrégats ou en concrétions botryoïdales. On le rencontre souvent associée au quartz massif avec d'autres minéraux secondaires du cuivre tels que la malachite ou la turquoise et exceptionnellement en inclusions dans le cristal de roche.</p> <p>Mexique; Arizona, Californie, USA.</p> <p><i>Figure 77 : Quartz à inclusions de chrysocolle. Photo de Jian Xin Liao.</i></p>	
Dioptase	$CuSiO_3 H_2O$	rhomboédrique
	<p>La diopside est un silicate de cuivre. En inclusion dans le quartz, les cristaux bleu vert en partie corrodés sont diagnostics d'une localité, Renéville au Congo (Gübelin & Koivula, 2005). De nombreux et minuscules cristaux de diopside peuvent aussi former des fantômes de croissance (Hyrs & Niedermayr, 2003).</p> <p>Renéville, Congo; Namibie.</p> <p><i>Figure 78 : Cristaux de diopside, grossissement 66x. Photo de E. Gübelin.</i></p>	
Dumortierite	$Al_7BO_3(SiO_4)_3O_3$	orthorhombique
	<p>La dumortierite est un borosilicate d'aluminium, ce minéral a été découvert dans la région lyonnaise en 1881. C'est une des inclusions à l'origine de la couleur bleue du quartz. Elles se présentent en profusion de petits cristaux bleu foncé, fibreux et coplanaires. Une étude montre que le quartz rose serait coloré par des micros inclusions de dumortierite (Ma et al., 2002).</p> <p>Brésil; Namibie.</p> <p><i>Figure 79 : Inclusions de dumortierite. Photo de T. Pradat. Source : www.gemmo.eu</i></p>	
Épidote	$Ca_2Fe^{3+}(Si_2O_7)Al_2(SiO_4)(Si_2O_7)(O OH)$	monoclinique
	<p>L'épidote forme une série avec la clinozoïsite, ces deux espèces sont difficiles à distinguer l'une de l'autre. C'est une inclusion protogénétique, les cristaux automorphes présentent un habitus prismatique allongé avec souvent une double terminaison (Hyrs & Niedermayr, 2003). La couleur verte à vert jaune ainsi que la présence de plan de clivage sont des signes distinctifs.</p> <p>Brésil, France, Madagascar, Pakistan...</p> <p><i>Figure 80 : Inclusions d'épidote, Brésil. Photo de T. Pradat. Source : www.gemmo.eu</i></p>	
Gilalite	$Cu_5Si_6O_{17-7}H_2O$	monoclinique
	<p>La gilalite est un silicate de cuivre hydraté. En 2004, des cristaux de quartz comportant des inclusions ressemblant à des méduses ont été découverts dans l'état de Paraíba au Brésil. Ces inclusions se présentent en agrégats fibro-radiés (Rondeau & Macri, 2005) à l'habitue globulaire vu de côté et au faciès discoïdal vu de dessus, avec parfois de vives zonations aux différentes nuances d'une même couleur.</p> <p><i>Figure 81 : Quartz à inclusions de gilalite. Photo de B. Rondeau.</i></p>	
Helvite	$Mn_4Be_3(SiO_4)_3S$	cubique
	<p>L'helvite est un tectosilicate qui cristallise dans le système cubique. Les cristaux inclus dans le quartz sont reconnaissables par leur habitus tétraédrique avec des faces distinctes (111), (110), (211) et leur couleur jaune vif (Gübelin & Koivula, 2005).</p> <p>Cependant, certains petits cristaux peuvent être érodés ou altérés et peuvent être alors confondus avec d'autres minéraux du système cubique (Hyrs & Niedermayr, 2003).</p> <p>L'helvite peut présenter une fluorescence rouge aux UVC.</p> <p>Brésil, Chine, Kazakhstan.</p> <p><i>Figure 82 : Cristaux d'helvite, Chine, grossissement 10x. Photo de J. Koivula.</i></p>	

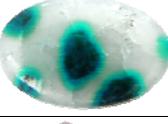
Montmorillonite	$(\text{NaCa})_{0,33}(\text{AlMg})_2(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2 \cdot (\text{H}_2\text{O})_{10}$	monoclinique
	<p>La montmorillonite est un phyllosilicate, un minéral argileux. Des spécimens ont été trouvés en Californie (White Queen Mine), USA. Ces inclusions rose pâle sont fibreuses, l'aspect est terreux. Aucune étude gemmologique n'est venue confirmer cette inclusion dans le quartz, il pourrait s'agir d'autres minéraux argileux (Hyrsl & Niedermayr, 2003).</p> <p><i>Figure 83 : Quartz à inclusions de montmorillonite. Photo de R. Lavinsky</i></p>	
Népouite	$\text{Ni}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	orthorhombique
	<p>La népouite est un silicate du groupe des serpentines. Il forme une série avec la lizardite. Le nickel est à l'origine de sa couleur verte. Les cristaux se présentent en masse compacte et dense formant des volutes épaisses à la couleur vert émeraude (Koivula et al., 2004). Kastamonu, Turquie.</p> <p><i>Figure 84 : Quartz à inclusions de népouite. Photo de J. Koivula.</i></p>	
Papagoïte	$\text{CaCuAl}(\text{Si}_2\text{O}_6)(\text{OH})_3$	monoclinique
	<p>La papagoïte est un rare silicate de cuivre. C'est une des inclusions les plus recherchées du quartz, les spécimens proviennent des mines de cuivre de Messina en Afrique du Sud tout comme l'ajoïte et la shattuckite (Hyrsl & Niedermayr, 2003). Ces inclusions bleu vif se caractérisent par leur morphologie en aiguilles fines et souples se regroupant en gerbe ou en nid d'oiseau (Gübelin & Koivula, 2005).</p> <p><i>Figure 85 : Prisme de quartz à inclusions de papagoïte. Source : www.johnbetts-fineminerals.com</i></p>	
Pezzotaïte	$\text{Cs}(\text{Be}_2\text{Li})\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$	rhomboédrique
	<p>La pezzotaïte est une espèce minérale découverte à Madagascar en 2002. Ce minéral riche en césium a une composition chimique similaire à celle du béryl mais son système cristallin est rhomboédrique. Parmi les spécimens issus de la pegmatite de Sakavalana à Madagascar un cristal de quartz contenait une inclusion de pezzotaïte. Un cristal à l'habitus tabulaire, rose pâle avec un faible pléochroïsme rose à rose orangé (Koivula & Tannous, 2005).</p> <p><i>Figure 86 : Inclusion de pezzotaïte, Madagascar. Photo de J. Koivula.</i></p>	
Pyrophyllite	$\text{Al}_4(\text{Si}_8\text{O}_{20})(\text{OH})_4$	monoclinique
	<p>La pyrophyllite est un silicate d'aluminium hydroxylé. Des spécimens ont été découverts récemment au Brésil, mais elle a déjà été signalée en inclusion dans le quartz par Zodac (1937) aux USA, en Arkansas. Les cristaux se présentent en agrégats foliacés et radiés de couleur jaune orangé à brun rouge. Brésil.</p> <p><i>Figure 87 : Inclusions de pyrophyllite. Source : www.gems-inclusions.com</i></p>	
Shattuckite	$\text{Cu}_5(\text{SiO}_3)_4(\text{OH})_2$	orthorhombique
	<p>La shattuckite est un silicate hydroxylé de cuivre de système cristallin orthorhombique à la couleur variant du bleu foncé au bleu turquoise. En inclusion dans le quartz, elle présente une morphologie fibreuse organisée en réseau ou en concrétion. Un cristal exceptionnel a été exposé à Tucson en 2010 provenant de la mine Okenwasi, Plateau de Kaokoveld en Namibie.</p> <p><i>Figure 88 : Quartz à inclusions de shattuckite, Namibie. Photo T. Pradat. Source : www.gems-plus.com</i></p>	
Sphène	$\text{CaTi}(\text{SiO}_5)$	monoclinique
	<p>Le sphène ou titanite est un silicate de titane et de calcium de couleur jaune, brun ou vert. Ses particularités sont un trichroïsme prononcé, une grande biréfringence, un éclat sub-adamantin ainsi qu'une forte dispersion. Les cristaux inclus dans le quartz se caractérisent par un habitus en forme de coins, ces cristaux peuvent être aussi parfois maclés (Hyrsl & Niedermayr, 2003). Brésil, Mexique, Suisse.</p> <p><i>Figure 89 : Quartz à inclusions de sphène. Source : www.johnbetts-fineminerals.com</i></p>	
Sugilite	$\text{KNa}_2(\text{Fe}^{2+} \text{Mn}^{2+} \text{Al})_2\text{Li}_3\text{Si}_{12}\text{O}_{30}$	hexagonal
	<p>La sugilite est un cyclosilicate pourpre à rose souvent taillé en cabochon. Un des meilleurs gisements est la mine de Wessels située en Afrique du Sud. Dans cette mine, des prismes de quartz à inclusion de sugilite, transparents et parfaitement formés ont été extraits (Lavinsky, 2010). Les cristaux inclus se présentent en agrégats à grain fin formant ainsi des masses compactes.</p> <p><i>Figure 90 : Inclusions de sugilite, Afrique du Sud. Photo de R. Lavinsky.</i></p>	

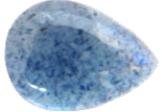
CHAPITRE II - MATERIAUX ET METHODES

A - Présentation des échantillons

Ce tableau est une description sommaire des 15 échantillons issus de ma collection et utilisés pour la réalisation de ce mémoire.

Il mentionne pour chaque pierre, la taille, la masse en carats, la dimension en millimètres et la provenance. Les inclusions de ces échantillons sont citées à titre indicatif telles qu'elles ont été stipulées lors de la vente, mais l'identification reste évidemment à confirmer.

Réf.	Photos	Taille	Poids en carats	Dimensions en millimètres	Provenance	Inclusions potentielles à confirmer
AB01		facettée taille à pans coupés	8.85	15.8 x 9.9 x 7.2	Brésil	Clinochlore
AB02		cabochon rond	18.98	Ø17 H 9.5	Brésil	Brookite
AB03		cabochon ovale	13.87	17.9 x 13.2 x 7.9	Brésil	à déterminer
AB04		cabochon plat ovale	5.65	21.5 x 13.9 x 2.6	Californie U.S.A	Chrysocolle
AB05		prisme	97.79	37.6 x 26.2	Rio Grande Do Sul Brésil	Cristobalite
AB06		facettée ovale	6.08	14.3 x 11.4 x 6.5	Brésil	Cristobalite
AB07		facettée taille coussin	9.57	16.4 x 12.3 x 6.4	Brésil	Covellite
AB08		cabochon rectangle aux cotés arrondis	23.47	19 x 16.8 x 9	Brésil	à déterminer
AB09		goutte poire	52.36	26.8 x 22.3 x 15.2	inconnue	à déterminer
AB10		cabochon facetté à damiers	66.90	27.5 x 23.7 x 14.2	Madagascar	à déterminer
AB11		facettée ronde	1.25	Ø7.1 H 4.7	Brésil	Gilalite

AB12		prisme	45.29	34.2 x 13.2 x 12.8	Madagascar	Céladonite
AB13		cabochon poire	1.14	8 x 5.3 x 3.5	Madagascar	Lazulite
AB14		facettée taille à pans coupés	3.28	10.9 x 9.1 x 4.5	Madagascar	Lépidocrocite
AB15		facettée poire	5.18	16.8 x 10.6 x 5.9	Brésil	Hématite

B - Description des méthodes d'analyses

1 - Gemmologie classique

Dans le cas de ce mémoire traitant des inclusions dans le quartz, la gemmologie classique a pour but de s'assurer avant toute autre analyse que le minéral hôte est bien un quartz. Les 15 échantillons ont été analysés avec les instruments classiques de gemmologie. Les données obtenues ont été transcrites sous forme de tableau dans le chapitre III - Résultats.

La loupe triplet 10x

Elle permet d'observer la transparence, l'éclat ou une possible réflexion interne ainsi que l'aspect de la surface et la présence d'éventuelles cassures, rayures, ébréchures, clivages du matériau gemme. Elle permet aussi lors de ce premier examen d'observer la morphologie des inclusions cristallines et surtout de déterminer si ces inclusions affleurent, caractéristique essentielle et indispensable pour l'analyse avec la plupart des outils de laboratoire.

Le polariscope de marque Gem-A

Il permet d'observer le matériau gemme en rotation, en lumière transmise entre filtres polarisants croisés afin de déterminer le caractère optique de la pierre. Le polariscope associé au conoscope permet de voir les figures d'interférence dans les matériaux biréfringents. Dans le cas du quartz la figure est souvent distinctive on la qualifie "d'œil de taureau".

Le réfractomètre de marque Gem-A

Il permet de lire l'indice de réfraction, de calculer la biréfringence et de déterminer le signe optique de la pierre. Les pierres facettées sont posées sur la table, pour les autres il faut soit chercher une face appropriée plane et polie, soit utiliser la méthode du point (lecture cabochon moins précise et approximative) pour les matériaux gemmes bombés.

Le filtre de Chelsea de type Gem-A

Test pouvant être utile dans certains cas lorsque le quartz est coloré par ses inclusions, il peut permettre par exemple de détecter une éventuelle présence de chrome, cobalt, vanadium, etc. dans l'inclusion. Tous les échantillons seront testés avec ce filtre sous un fort éclairage incandescent.

Le dichroscopie à filtres polarisants de marque GEM-A

Ce test peut également être utile pour détecter le pléochroïsme de certains cristaux inclus anisotropes, de couleur, transparents à translucides.

La boîte U.V de marque Diaminor CN6 + lampes Vilber Lourmat

Le matériel utilisé est une chambre noire équipée d'une lampe U.V.C émettant à 254 nm et d'une lampe U.V.L émettant à 365 nm avec une puissance de 6 watts, la distance d'observation est de 20 centimètres environ. Tous les échantillons seront testés afin de déterminer si certaines inclusions luminescent aux ultraviolets.

La balance hydrostatique de marque Mettler Toledo XS104

La masse spécifique "densité" de chaque échantillon est déterminée au moyen de la pesée hydrostatique, dans le cas du quartz cristallin le calcul attendu sera approximativement de 2,65.

Le microscope trinoculaire

Les inclusions ont été observées et photographiées avec une trinoculaire de marque Leica MZ6 équipée d'un appareil photo numérique compact et de deux fibres optiques, mais également avec ma trinoculaire de marque GEM SET équipée d'une caméra Motic 2000 et d'une fibre optique. Pour chaque échantillon, les différentes caractéristiques telles que la forme, la taille, la couleur et la transparence ainsi que le positionnement dans la pierre seront décrits.

2 - Gemmologie de laboratoire

Les instruments de gemmologie de laboratoire ont été utilisés à l'institut des Matériaux Jean Rouxel et au Laboratoire de Planétologie et Géodynamique de la Faculté des Sciences de l'université de Nantes.

Microscopie électronique MEB

Le microscope à balayage électronique (MEB) est une technique d'imagerie qui permet avec un faisceau d'électrons de grossir jusqu'à 100 000 fois et plus, il permet aussi de faire des analyses chimiques quantitatives par spectrométrie à dispersion d'énergie (EDS) et des imageries de cathodoluminescence (CL).

L'instrument utilisé est de marque JEOL, modèle JMS 5800 LV, il est équipé d'un détecteur à dispersion d'énergie de marque PGT IMIX (figure 91).

Les conditions de fonctionnement sont les suivantes : une tension d'accélération de 20 kV, un courant de 0,3 nA et un angle de vue du détecteur à 37°.

Les échantillons doivent être préparés, ils sont métallisés (or, platine, carbone) dans une chambre à vide pour les rendre conducteurs d'électricité. La surface analysée doit être polie, plane et perpendiculaire au faisceau. L'analyse chimique (EDS) est possible lorsque l'inclusion affleure en surface, on peut alors obtenir un spectre de composition chimique de l'inclusion étudiée ainsi que les pourcentages des éléments chimiques présents. Certains échantillons dont les inclusions ne sont pas affleurantes devront être préparés.

La teneur en oxygène est par contre calculée par stœchiométrie, méthode qui permet de mesurer les proportions quantitatives des éléments chimiques détectés. Il est impossible de détecter les pourcentages des éléments légers tels que le lithium ou le béryllium au moyen d'un détecteur en dispersion d'énergie.



Figure 91 : MEB JEOL JSM-5800LV

Spectrométrie Raman

La sonde Raman est un spectromètre qui permet d'obtenir de façon non destructive un spectre afin d'identifier de nombreux matériaux qu'ils soient bruts, taillés ou sertis. Tous les matériaux peuvent être analysés, quel que soit l'état sous lequel ils se présentent (solide, liquide ou gazeux). La spectrométrie Raman permet également de séparer les polymorphes.

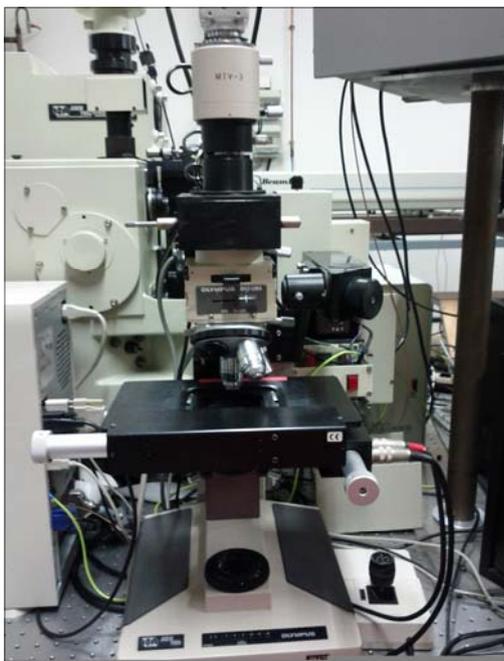


Figure 92 : Raman HORIBA T64000

Principe de la méthode.

La spectrométrie Raman permet d'étudier la réponse vibrationnelle de matériaux cristallisés ou amorphes. Ils sont excités à l'aide d'un faisceau laser monochromatique et intense à une longueur d'onde bien spécifique. Les lasers utilisés peuvent avoir différentes fréquences d'excitation par exemple dans le domaine du visible à 458, 488, 514, 633 nm. Ce type de spectromètre permet d'observer les fréquences de vibration intrinsèque à chaque molécule et de produire un spectre du matériau analysé. On compare ensuite, le ou les spectres obtenus avec ceux présents dans une base de données comme par exemple celle du RRUFF, disponible et gratuite en ligne (www.rruff.info). Cependant la prudence s'impose, car certains spectres de plusieurs composés différents peuvent avoir un profil très similaire.

Lors de l'acquisition d'un spectre, certains types de problèmes peuvent survenir :

- Certains solides ne "ramanisent" pas ou fournissent des spectres peu exploitables (les oxydes noirs absorbent et diffusent mal, certains sulfures, certains éléments natifs métalliques ou semi-métalliques...). Le temps peut parfois compenser le rapport signal sur bruit pour les échantillons qui ramanisent mal.
- D'autres facteurs peuvent affecter la qualité d'un spectre, des raies cosmiques, des émissions parasites dues au signal des lampes environnantes, lampes de bureau, écran d'ordinateur, néon...
- Autre grand ennemi du Raman, la luminescence. Certains matériaux émettent un fort rayonnement de luminescence lorsqu'ils sont excités par la raie à 514 nm du laser argon et ce rayonnement peut masquer totalement les raies Raman. Cependant, le problème peut être résolu en changeant la longueur d'onde excitatrice dans le domaine spectral du rouge, par exemple.

Les échantillons ont été analysés sur deux spectromètres Raman dispersifs de Marque HORIBA Jobin & Yvon, modèle T64000 (figure 92) et modèle LabRam 300, chacun équipé d'un faisceau laser monochromatique dont la longueur d'onde est à 514 nm. Un contrôle de la matrice sera systématiquement effectué, les résultats attendus devraient correspondre au spectre (figure 5, page 4). À noter que certains spectres de ce mémoire montrent uniquement les vibrations du matériau analysé, d'autres spectres cumulent les pics de la matrice et les pics de l'inclusion.

AB01

Description

Cet échantillon incolore a été acheté à la société Gemfrance et vendu comme étant un quartz à inclusions de clinochlore, il provient du Brésil.

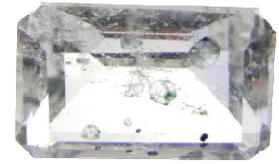


Figure 93 : échantillon AB01 à inclusions dites de "clinochlore".

Polariscope	rétablit la lumière tous les 90° sauf dans l'axe optique		
Indice de réfraction	No	Ne	Biréfringence
	1.544	1.553	0.009
Luminescence	U.V.C	U.V.L	
	Inerte	inerte	
Densité	2.632		
Pléochroïsme	de l'inclusion (figure 95), faible, vert à jaune clair		
Résultat	quartz		

Tableau 4 : Test de gemmologie classique de l'échantillon AB01



Figure 94 : Minéral clinochlore
Source : www.mineralatlas.eu

Chlorite désigne le nom d'un groupe de onze phyllosilicates (tétraèdres en feuillets), cette disposition structurale en couches se répercute sur les propriétés physiques de ces types de silicates, habitus en feuillets, clivage basal parfait, faible dureté, essentiellement de structure cristalline monoclinique.

Parmi les membres de ce groupe, le clinochlore (figure 94) forme une série avec la chamosite. Les spécificités physiques de ces phyllosilicates font que les différentes espèces sont souvent difficiles à différencier (Bishop et al., 2001) à plus forte raison en inclusion dans le quartz.

Généralement, le clinochlore se rencontre sous forme de fantôme aux différentes nuances de vert, mais la ripidolite, la sudoïte, la sheridanite, autres membres des chlorites peuvent également prendre cet habitus en inclusion dans le quartz (Hyrsl & Niedermayr, 2003).

Observation des inclusions au microscope

L'échantillon étudié comporte treize inclusions de tailles différentes, deux d'entre elles ont une dimension plus importante, elles mesurent environ 1.7 mm. Ces inclusions sont proches de la surface de la pierre, elles sont de couleur verte non homogène, la couleur se concentrant essentiellement sur les bords, mais également en tâche dont la couleur est plus soutenue. La figure 95 présente une première photo prise en lumière transmise avec un grossissement de 15 x. On peut observer la présence de deux inclusions à la forme pseudo-hexagonale ayant une texture fibro-radiée.

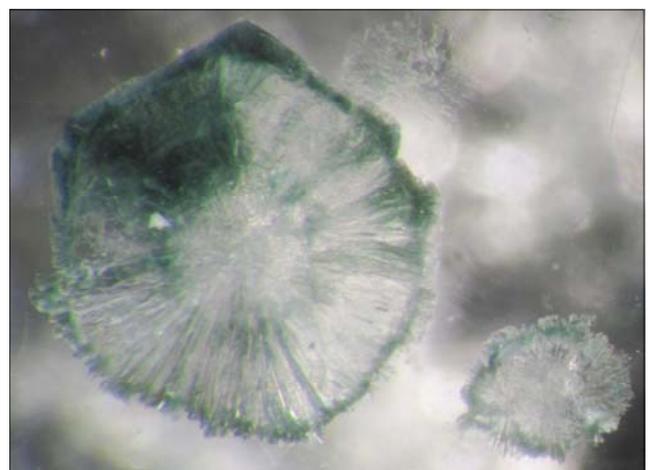
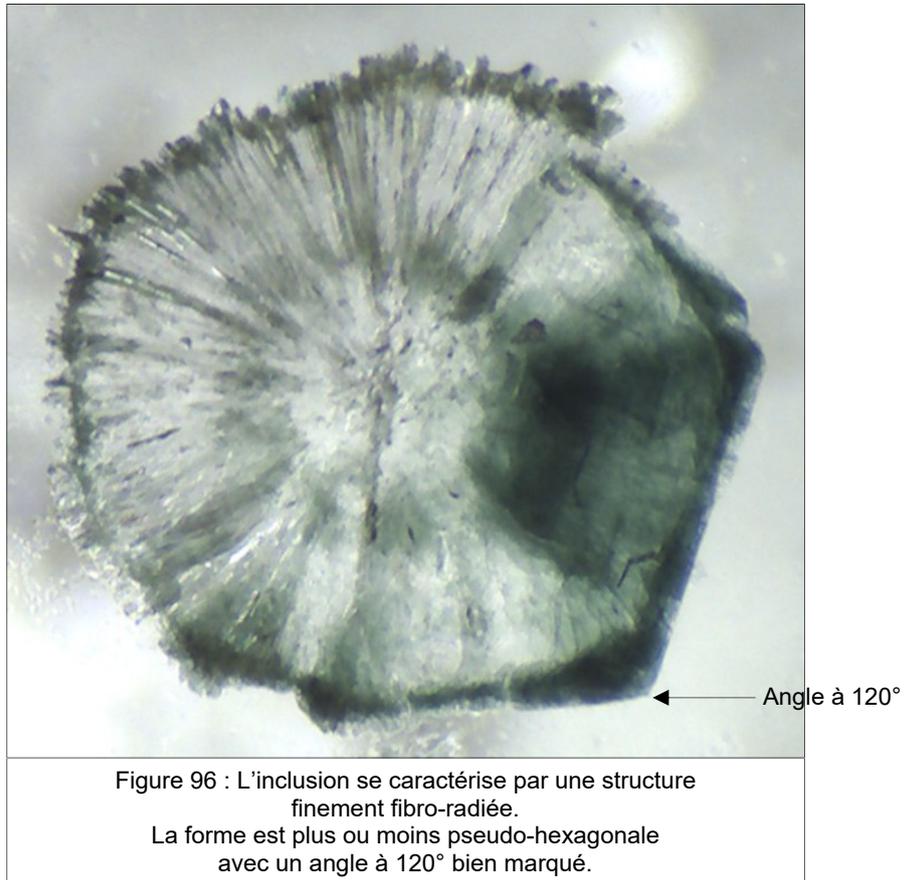


Figure 95 : deux inclusions à la forme pseudo-hexagonale révèlent une texture fibro-radiée, la couleur verte est hétérogène.

La figure 96 montre une photo prise en lumière transmise, mais avec un grossissement de 25 x. Les détails se discernent mieux, la structure est finement fibro-radiée. Le pourtour est inégal, la forme est plus ou moins pseudo-hexagonale avec un angle à 120° bien marqué. Les cristaux ne sont pas vraiment formés, il se présentent en agrégats lamellaires et foliacés. Visuellement, l'aspect général de cette inclusion est très ressemblant à celle de la figure 94, photo du minéral clinochlore.



Observation au MEB

L'étude des inclusions a été effectuée au moyen d'un MEB JEOL JSM-5800LV en choisissant une tension d'accélération de 15 kV.

- La figure 97 présente une image de l'inclusion principale prise en électron secondaire, cette méthode permet d'avoir une bonne résolution d'image.
- La figure 98 présente une image de la même inclusion, mais prise en électron rétrodiffusé, méthode qui permet d'obtenir plus de contraste chimique et de relief.

En grossissant à 270 fois, on peut constater que l'inclusion est composée de lamelles radiales au centre plus ou moins contrasté. L'analyse chimique EDS n'a pas pu être effectuée sur cet échantillon, car le polissage a surcreusé les lamelles et enduit les creux de produits de polissage. On observe seulement que l'inclusion est de dureté nettement inférieure à celle du quartz.

À ce stade des observations, il n'est toujours pas possible d'affirmer une éventuelle présence de clinochlore dans ce quartz.

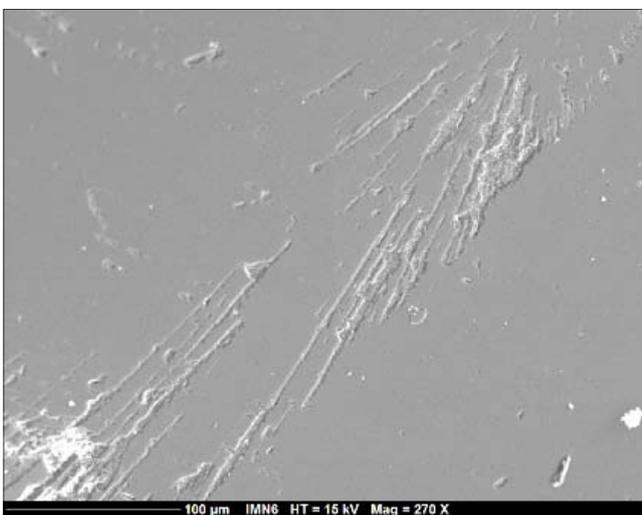


Figure 97 : Image obtenue en électron secondaire SE

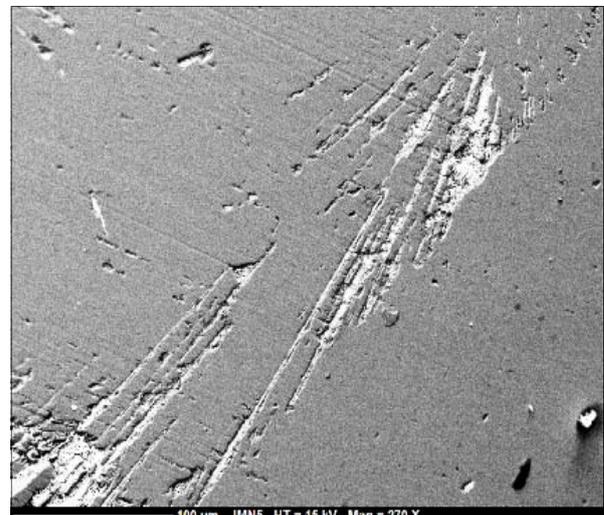
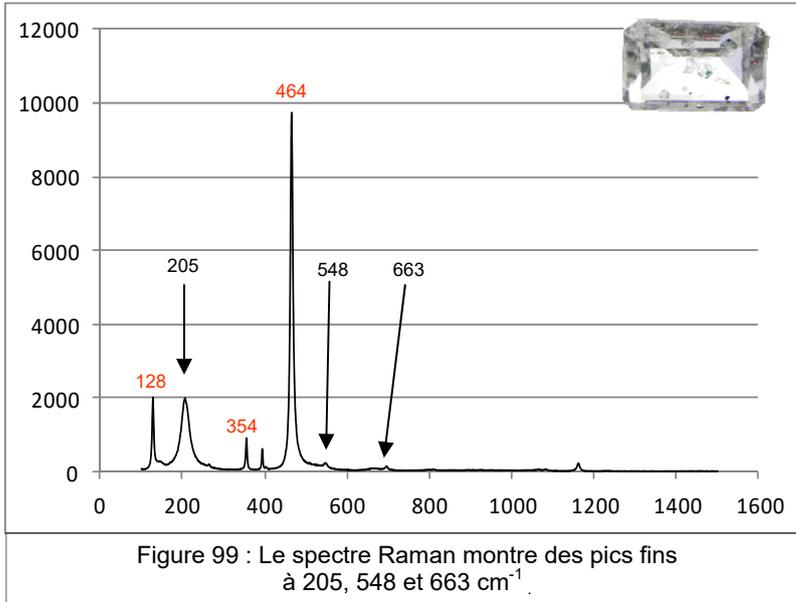


Figure 98 : Image obtenue en électron rétrodiffusé BSE

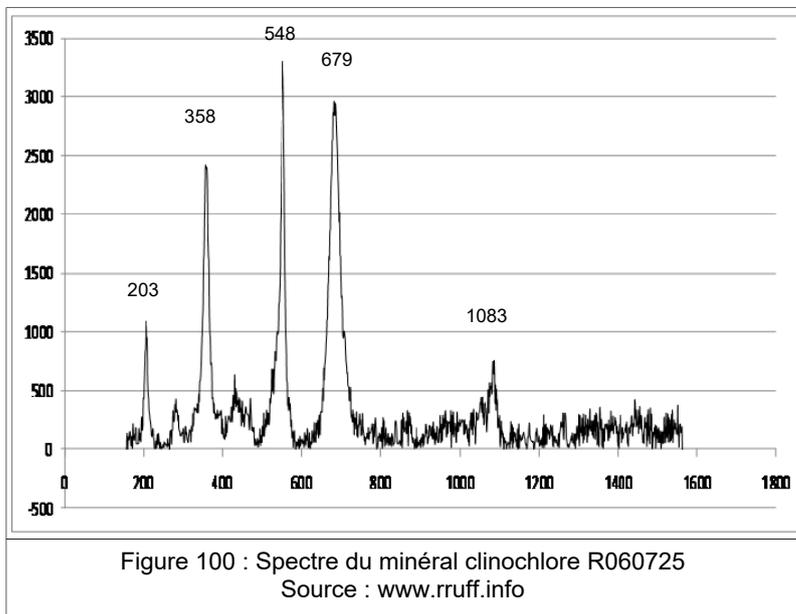
Tests Raman

L'échantillon a été testé au moyen d'un Raman dispersif de marque HORIBA, modèle T64000. Le spectre a été obtenu avec un temps d'acquisition de 10 secondes, un autre test à été effectué avec un temps d'acquisition de 60 secondes. Ce spectre (figure 99) présente malheureusement peu de signaux, les inclusions en feuillets étant beaucoup trop fines.

- Le pic à 205 cm⁻¹ est non discriminant, le clinochlore montre un pic à 204, mais le quartz aussi à 207 cm⁻¹.
- En plus des pics du quartz, le spectre montre des pics fins à 548 et 663 cm⁻¹. Ces pics peuvent être cohérents avec le clinochlore (voir figure 100), car la position du pic à 663 cm⁻¹ peut varier par rapport à des substitutions fréquentes dans les phyllosilicates entre les atomes de Fe et de Mg.



Pics principaux
<u>205</u>
<u>548</u>
<u>663</u>
Pics du quartz
128
207
354
<u>464</u>



Pics principaux
<u>203</u>
278
<u>358</u>
429
<u>548</u>
<u>679</u>
1083

Discussion

- L'aspect des inclusions dans leur forme et leur structure (figure 94) est comparable à ce phyllosilicate, membre du groupe des chlorites.
- L'inclusion présente un pléochroïsme visible (tableau 4), mais de faible intensité, vert à jaune clair. Le clinochlore possède cette caractéristique (Mindat.org).
- Malgré le faible signal, les pics obtenus concordent avec ceux du spectre de référence RRUFF (figure 100) et sont en faveur du clinochlore.

Conclusion : Quartz à inclusions de clinochlore.

AB02

Description

Cette pierre a été achetée au salon de Tucson en 2013 et vendue comme étant un quartz à inclusions de brookite ou "Platinum quartz", il provient du Brésil.



Figure 101 : échantillon AB02 à inclusions dites de "brookite".

Polariscope	rétablit la lumière tous les 90° sauf dans l'axe optique		
Indice de réfraction	No	Ne	Biréfringence
Lecture cabochon	environ 1.54		
Luminescence	U.V.C	U.V.L	
	inerte	inerte	
Densité	2.645		
Résultat	quartz		

Tableau 5 : Test de gemmologie classique de l'échantillon AB02



Figure 102 : Photo J.I Koivula.
Grossissement 5 x,
lame centrale de brookite et
nombreux cristaux de rutile en épitaxie.

La brookite, le rutile et l'anatase sont les trimorphes de TiO_2 , le dioxyde de titane. La brookite cristallise dans le système orthorhombique, son habitus est généralement tabulaire, les cristaux sont le plus souvent allongés et striés, la couleur varie du brun au brun orangé (Hatert, 2014).

Dans *Gems&Gemology* (Koivula & Tannous 2003b), une étude a été réalisée à partir d'échantillons en provenance du Minas Gerais au Brésil. Sous agrandissement, les inclusions montraient une lame centrale de brookite et de nombreux cristaux de rutile argenté avec une croissance orientée en épitaxie (figure 102).

La brookite est une inclusion protogénétique, elle se forme à une température inférieure à 500°C, la présence de ces deux polymorphes au sein du quartz démontre que lors de la formation la température a été augmentée de telle sorte que le rutile a été préféré (Koivula & Tannous 2003b).

Observation des inclusions au microscope

La figure 103 présente une inclusion prise au moyen d'un microscope Leica MZ6 couplé d'un appareil Canon S70, la photo a été prise en lumière transmise avec un grossissement de 25 x. Cet échantillon présente deux inclusions similaires. L'étude porte sur celle représentée en figure 103, elle mesure environ 8,2 millimètres, elle est proche de la surface, mais elle n'affleure pas. Cette inclusion à l'apparence dite en "peigne" possède une lame centrale presque rectiligne, les cristaux aciculaires perpendiculaires à cette lame présentent un éclat métallique et sont plus foncés à la base qu'à leurs extrémités.

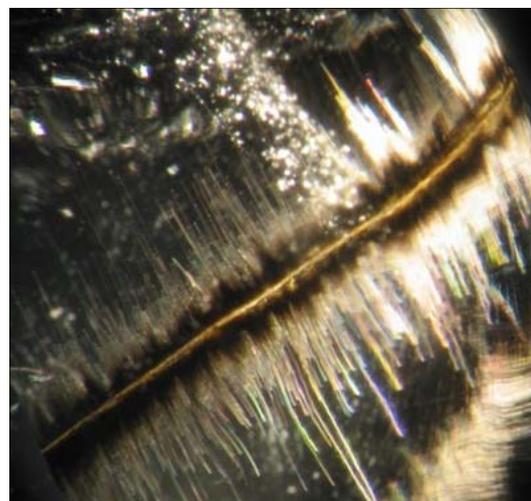
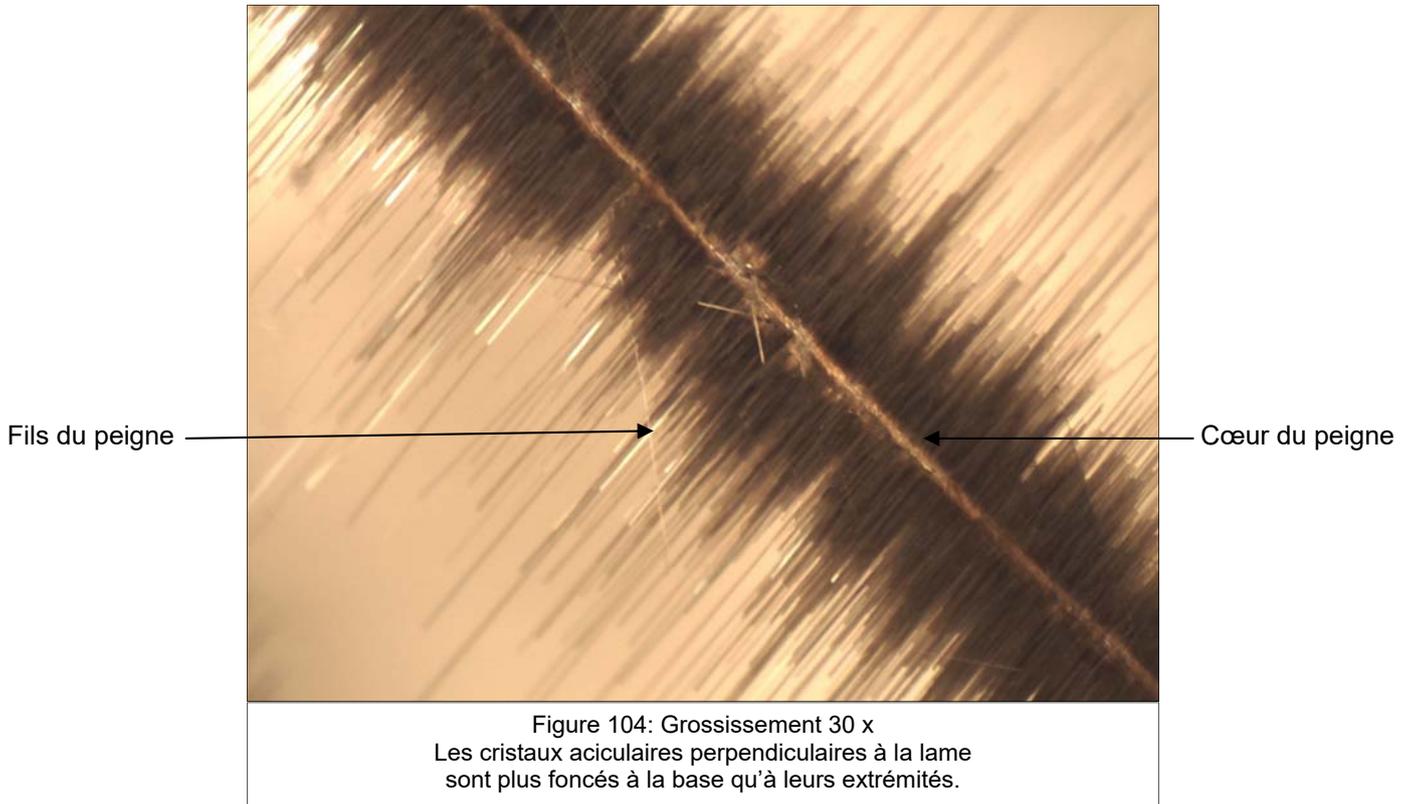


Figure 103 : Inclusion dite "en peigne".
Les cristaux aciculaires perpendiculaires à la
lame présentent un éclat métallique.



Analyses au MEB

Cet échantillon a été analysé au MEB JEOL JSM-5800LV avec une tension d'accélération de 20 kV et un courant de 0.3 nA.

Après analyse chimique EDS, on a pu obtenir la composition d'une partie de l'inclusion: titane et oxygène ont été détectés, mais pas les pourcentages des éléments chimiques présents. La formule étant TiO_2 , il faudra compléter par d'autres analyses afin de déterminer à quel polymorphe du dioxyde de titane nous avons à faire.

Tests Raman

Deux parties de l'inclusion ont été analysées au FT Raman BRUKER RFS 100, le cœur du peigne (figure 105) et les fils du peigne (figure 106).

Premier spectre du cœur du peigne

Plusieurs pics distincts apparaissent, un à 140 et une bande large à 237 ainsi que deux grands pics principaux à 444 et 608 cm^{-1} . Les pics obtenus sont conformes à ceux du spectre de référence RRUFF (figure 107) du rutile.

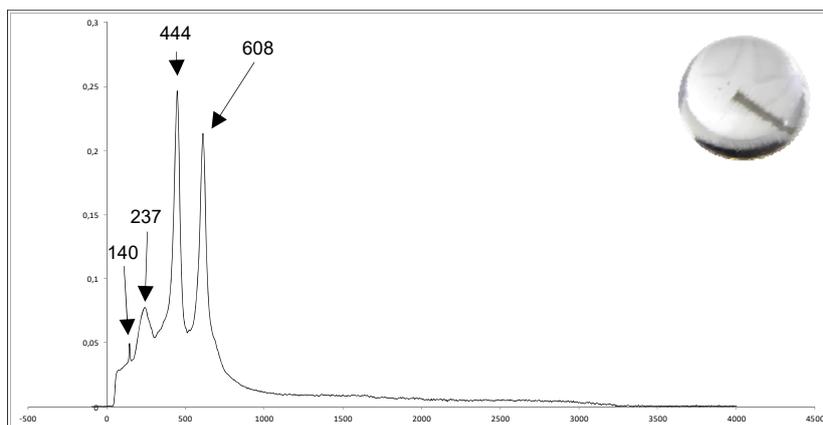


Figure 105 : Spectre du cœur du peigne avec des pics à 140, 237, 444 et 608 cm^{-1} .

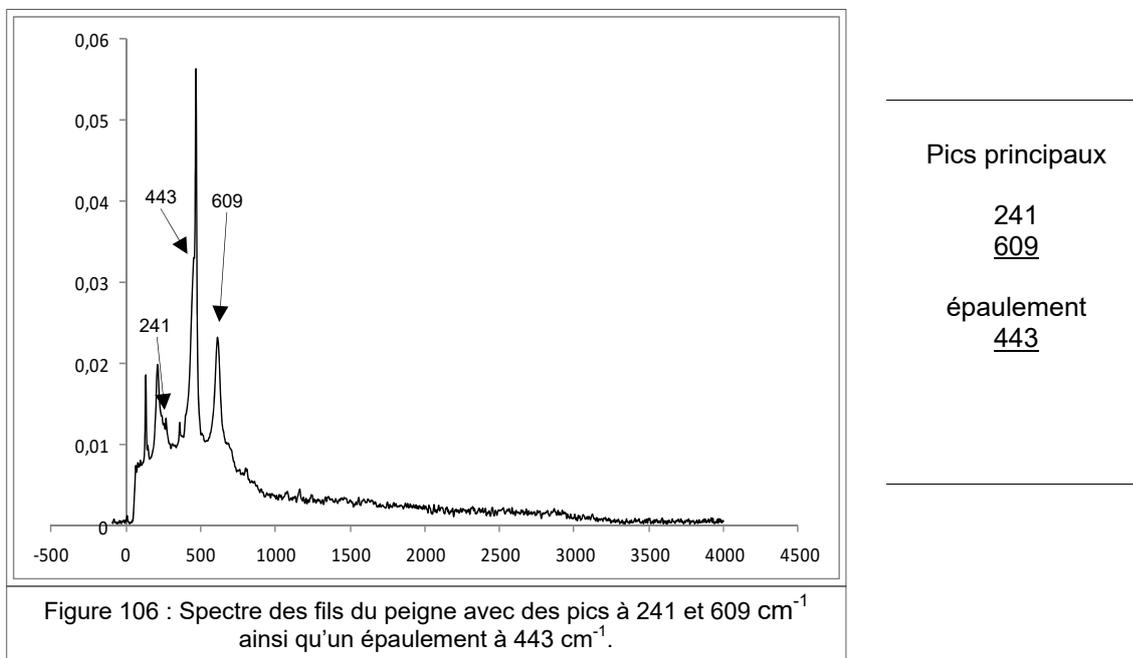
Pics principaux

140
237
444
608

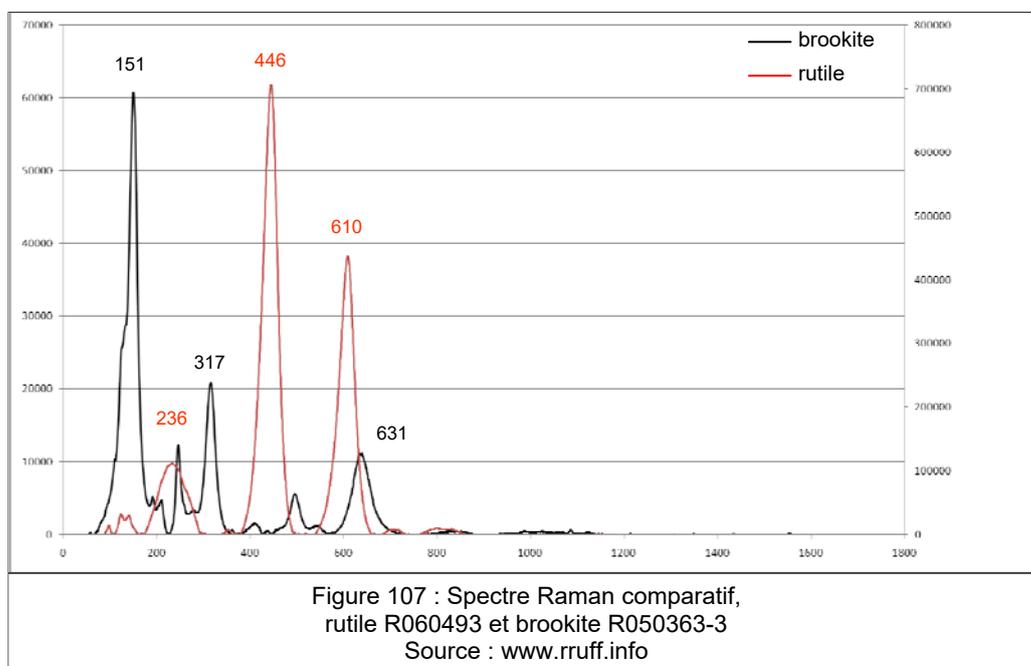
Le cœur de la lame a été à nouveau vérifié au Raman dispersif HORIBA T64000 avec un temps d'acquisition de 10s, le résultat obtenu est un épaulement à 439 ainsi qu'un pic à 607 cm^{-1} . Puis avec un temps d'acquisition de 20s, le résultat a été rigoureusement identique avec deux pics à 443 et à 609 cm^{-1} . Nous avons bien la confirmation que le cœur du peigne est du rutile.

Deuxième spectre des fils du peigne

Ce spectre (figure 106) donne des pics à 241 et à 609 cm^{-1} ainsi qu'un épaulement à 443 cm^{-1} , il s'agit à nouveau de rutile (voir spectre figure 107).



Les spectres Raman (figure 107) de ces deux polymorphes de TiO_2 sont dissemblables. Le rutile présente une fondamentale à 446 cm^{-1} , un grand pic à 610 cm^{-1} et une bande large à 236 cm^{-1} . La brookite présente deux pics à 317 et 631 cm^{-1} et une fondamentale à 151 cm^{-1} .



Discussion

La morphologie du cœur et des fils étant très différente, nous pouvons proposer que le cœur a d'abord cristallisé sous forme de brookite, puis qu'il s'est pseudomorphosé en rutile à l'occasion d'un changement de pression et de température favorable lors de l'histoire géologique.

Conclusion : Quartz à inclusions de rutile (croissance en épitaxie avant transformation).

AB03

Description

Cette pierre a été achetée au salon de Tucson en 2013, le vendeur brésilien ne savait pas de quel type d'inclusion il s'agissait.



Figure 108 : échantillon AB03

Polariscope	rétablit la lumière tous les 90° sauf dans l'axe optique		
Indice de réfraction	No	Ne	Biréfringence
	1.542	1.551	0.009
Luminescence	U.V.C	U.V.L	
	inerte	inerte	
Densité	2.638		
Pléochroïsme	de l'inclusion (figure 109), prononcé		
Résultat	quartz		

Tableau 6 : Test de gemmologie classique de l'échantillon AB03



Figure 109 : Grossissement 20 x.

Le solide inclus se caractérise par un habitus lamellaire et allongé. Il mesure environ 12 mm de long, l'épaisseur est relativement faible.



Figure 110 : Grossissement 35 x.

Le solide inclus dans la gemme est translucide.

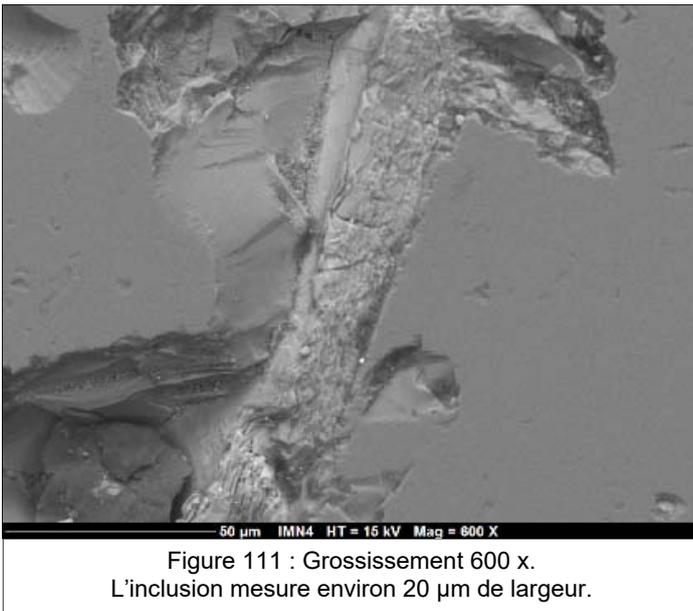
Observation des inclusions au microscope

Ce solide (figure 109) inclus dans la gemme à un habitus lamellaire et allongé, à l'allure flexible. Sa longueur est d'environ 12 mm et l'épaisseur paraît relativement faible. La couleur varie du brun jaune au brun rouge. L'observation au microscope en lumière réfléchie, montre de minces feuilletés à l'aspect miroitant (figure 109). Ce solide présente un pléochroïsme prononcé brun-orange-vert à rouge sombre noir (tableau 6). En lumière transmise (figure 110), le grossissement de 35 x permet de constater que ce solide est translucide. À première vue, l'aspect de cette inclusion fait penser qu'il pourrait s'agir d'un phyllosilicate. Un minéral se délitant en paillettes brillantes et brunes.

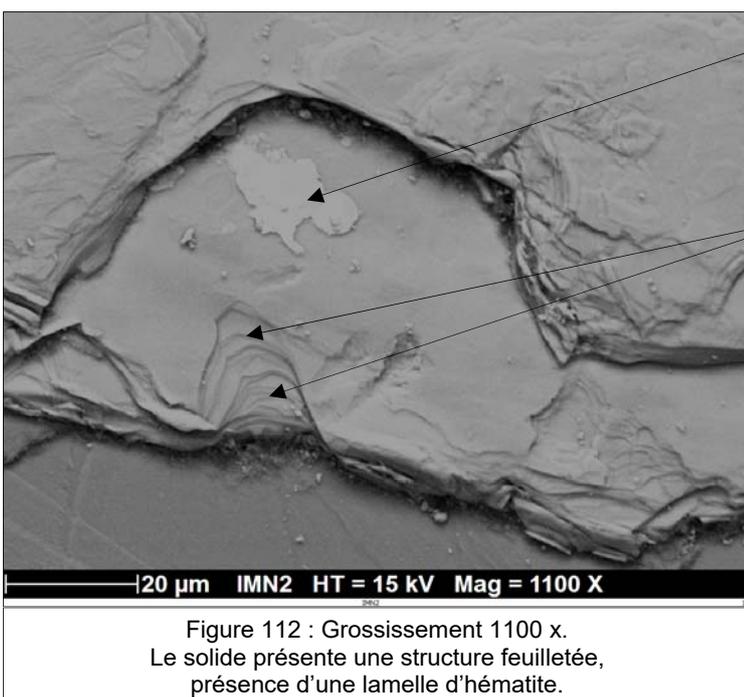
Tests Raman

Le premier test a été effectué au moyen d'un Raman dispersif HORIBA T64000 avec un temps d'acquisition de 10s, on a obtenu uniquement un spectre de fluorescence. Cette inclusion ne ramanise pas, est-ce que l'inclusion absorbe trop la lumière ou est-elle assez cristallisée? Le deuxième test a été réalisé sur le Raman HORIBA LabRam300, nous n'avons eu aucun signal et pas de spectre de fluorescence cette fois-ci.

Observation et analyses au MEB



Pour l'analyse au MEB, le cabochon a été taillé avec deux faces bien parallèles afin que l'inclusion devienne affleurante. L'image (figure 111) a été obtenue en mode électron rétrodiffusé BSE avec un grossissement de 600 x. L'inclusion mesure environ 20 µm de largeur, à ce grossissement la structure interne de l'inclusion semble fibreuse.

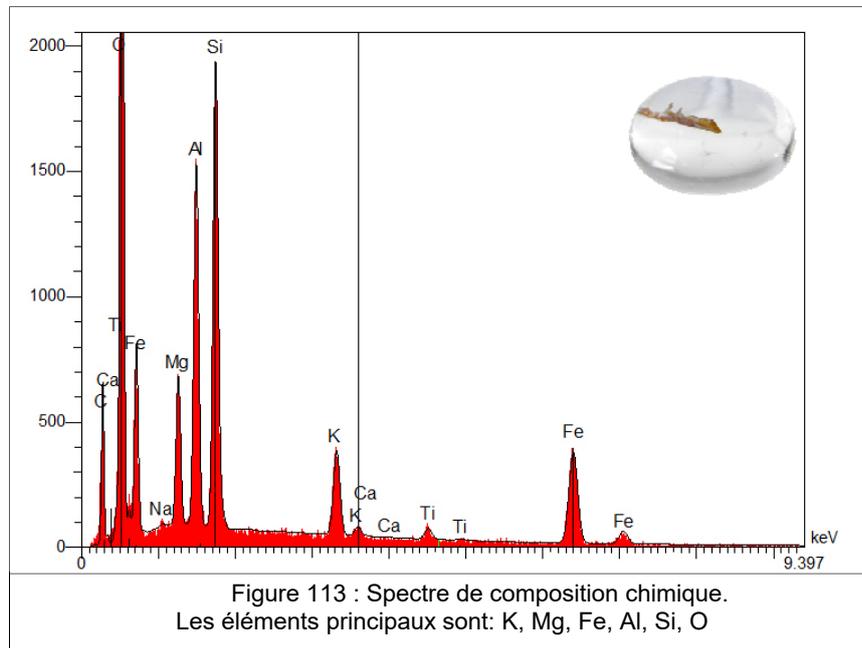


Lamelle d'hématite

Structure en feuillets

Avec un grossissement de 1100 x (figure 112), on peut mieux observer la structure feuilletée de ce probable phyllosilicate. La plaquette est plus riche en fer et moins riche en silicium, on peut apercevoir distinctement une lamelle analysée comme étant de l'hématite.

L'analyse chimique (EDS) devient possible lorsque l'inclusion affleure en surface. On a obtenu un spectre de composition chimique (figure 113), il s'agit d'un aluminosilicate de magnésium et de potassium riche en fer. La structure des aluminosilicates découle du remplacement de certains atomes de silicium par des atomes d'aluminium, ce qui est le cas des phyllosilicates. Les micas appartiennent à ce groupe de silicates dont la structure atomique est un empilement de feuillets tétraédriques (Pomerol et al., 2011).



Éléments	% Poids	% Atomique
O	34,92	65,78
Na	0,10	0,12
Mg	3,08	3,82
Al	6,91	7,72
Si	10,18	10,92
K	3,37	2,60
Ca	0,05	0,04
Ti	0,72	0,45
Fe	15,84	8,55
Total	75,16%	100,00%

Tableau 7 : Éléments en poids et % atomique.

Discussion :

L'observation au microscope avait déjà donné une première indication, une structure en feuillets caractéristique des phyllosilicates. Le matériau analysé ne ramanise pas, seule l'étude au MEB a permis de définir que nous sommes en présence d'un aluminosilicate de magnésium et de potassium (figure 113).

Le total des masses d'éléments analysés n'est que de 75,16%, il manque certainement un élément tel que l'hydrogène qui est non détectable car trop léger. On peut noter également un écart sur le taux d'oxygène à 34,92% pour 43,36% (webmineral.com/biotite) qui est mesuré et non calculé par stoechiométrie. Les autres éléments concordent avec toutefois quelques différences pour le fer **15,84%** pour 6,44% et le magnésium **3,08%** pour 14,02% (webmineral.com/biotite). Ces variations sont certainement dues à des substitutions fréquentes dans les phyllosilicates (Pomerol et al., 2011).

Nous pouvons conclure qu'il s'agit d'un mica riche en fer, probablement la variété ferro-phlogopite ou communément appelée 'biotite'.

Quartz à inclusions de biotite

AB04

Description

Cet échantillon a été acheté à Patrick de Koenigswarter de la société Miner K et vendu comme étant un quartz à inclusions de chrysocolle. Il est issu d'une ancienne collection américaine et provient d'une mine de cuivre située en Californie et fermée à ce jour.



Figure 114 : échantillon AB04 à inclusions dites de "chrysocolle".

Polariscope	rétablit constamment la lumière: polycristallin		
Indice de réfraction	No	Ne	Biréfringence
Lecture cabochon	environ 1.55		
Luminescence	U.V.C	U.V.L	
	inerte	inerte	
Densité	2.46		
Filtre de Chelsea	vert foncé		
Résultat	quartz		

Tableau 8 : Test de gemmologie classique de l'échantillon AB04



Figure 115 : Stalactites de chrysocolle.
Source: www.irocks.com

Le chrysocolle était déjà connu de Pline l'Ancien, dans son traité d'histoire naturelle datant du 1er siècle, il cite: on extrait l'or et avec l'or le chrysocolle ainsi nommé d'après ce métal afin qu'il paraisse plus précieux.

De formule $(\text{CuAl})_2\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})$, ce silicate de cuivre hydroxylé est relativement fréquent dans les gisements de cuivre. Il cristallise dans le système orthorhombique. Les couleurs vont du bleu, bleu vert à vert avec souvent un mélange des trois (Hatert, 2014).

Le chrysocolle se présente généralement en agrégats stalactitiques (figure 115) ou en concrétions botryoïdales, mais l'habitus peut-être aussi massif ou cryptocristallin. On le rencontre souvent associé au quartz massif avec d'autres minéraux secondaires du cuivre tels que la malachite ou la turquoise notamment au Mexique (Pradat, 2014).

Observation des inclusions au microscope

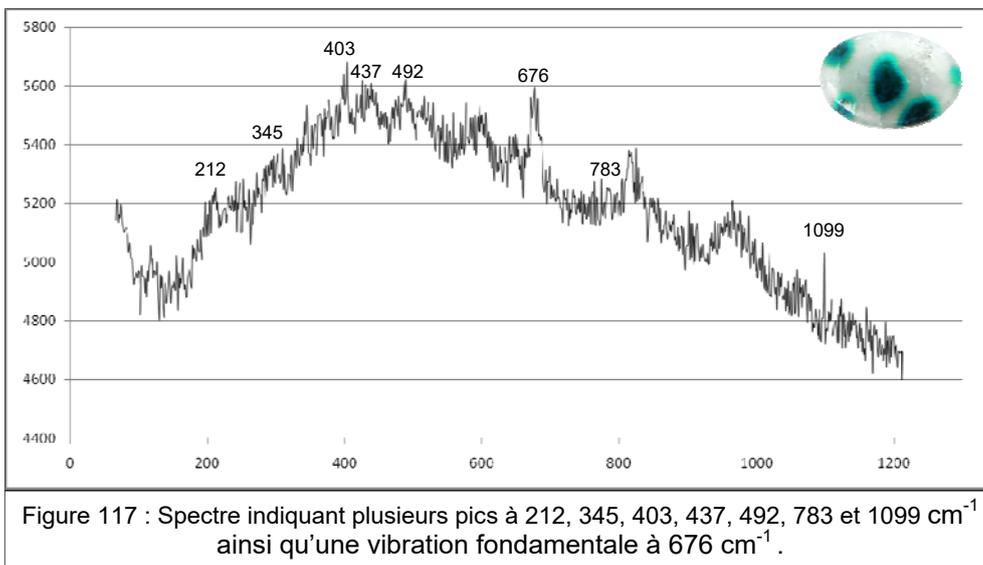
Cet échantillon comporte cinq inclusions translucides. L'inclusion principale représentée (figure 116) mesure environ 8,6 x 5,9 mm. Ces solides présents dans la gemme sont caractérisés par une coupe transversale de concrétions stalactitiques. La morphologie des cristaux est plus ou moins rubanée, la couleur varie du vert foncé au vert bleu, elle est inhomogène. La photo montre que l'inclusion a une nette tendance à se craqueler. La matrice présente également des tensions internes.



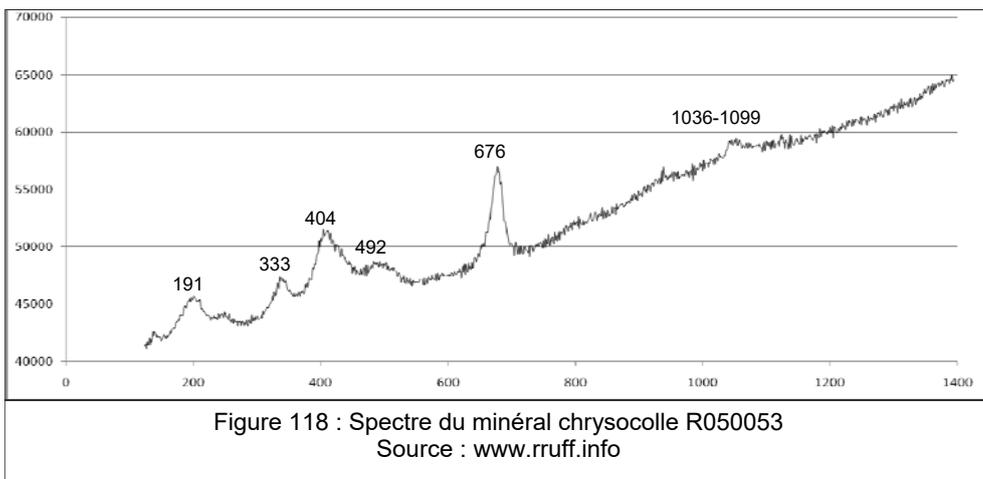
Figure 116 : Grossissement 30 x.
Les cristaux inclus présentent un aspect rubané et montre une tendance à se craqueler.

Tests Raman

Nous avons effectué plusieurs tests. Après un premier test non probant, nous avons diminué le faisceau par 100. Les différents spectres obtenus présentent beaucoup de bruit. Pour le dernier test, le temps d'acquisition a été augmenté à quatre minutes. Les résultats recueillis lors du dernier test (figure 117) montrent une vibration fondamentale à 676 cm^{-1} . On peut observer également plusieurs pics à $212, 345, 403, 437, 492, 783$ et 1099 cm^{-1} ainsi qu'une bande large à 965 cm^{-1} .



Ces données sont comparées au spectre de référence RRUFF (figure 118) du chrysocolle. Les pics à $191, 333, 404, 492$ et 1099 cm^{-1} et la fondamentale à 676 cm^{-1} sont en tout point semblable. Ils sont bien en faveur du chrysocolle.



Discussion :

Le spectre Raman du chrysocolle est de mauvaise qualité, cependant on trouve les vibrations principales de ce minéral à la fois en position de bande et en largeur de bande.

Cet échantillon de collection n'a pas pu être préparé pour une analyse au MEB mais les résultats au Raman nous permettent de conclure.

Cette inclusion de stalactites de chrysocolle vient juste d'être mentionnée dans la littérature (Beaton & Sehgal 2015) alors que cette étude concerne des matériaux extraits dans les années 70 d'une mine de cuivre située à Globe en Arizona. Ce matériau est composé de quartz dans les parties transparentes et dans celles translucides de calcédoine. Nous connaissons déjà des calcédoines (Gem Silica) colorées par des inclusions submicroscopiques de chrysocolle provenant de la même région de l'Arizona (Inspiration Mine, Gila County).

Il existe également une autre source en Arizona (Tucson, Ray Mine), un matériau appelé Blue Dot Chrysocolle qui présente exactement les mêmes inclusions.

Quartz à inclusions de chrysocolle.

AB05

Description

Ce brut a été acheté à Mr Egor Gavrilenko, société Gem-Sphalerite en Espagne et il a été vendu comme étant une améthyste à inclusions de cristobalite. Il provient de la région du Rio Grande do Sul au Brésil.



Figure 119 : échantillon AB05 à inclusions dites de "cristobalite".

Polariscope	rétablit la lumière tous les 90° sauf dans l'axe optique		
Indice de réfraction	No	Ne	Biréfringence
	1.541	1.550	0.009
Luminescence	U.V.C	U.V.L	
	inerte	inerte	
Commentaire	inclusions légèrement blanchâtres aux UVL		
Densité	2.635		
Filtre de Chelsea	violet sombre		
Résultat	quartz variété améthyste		

Tableau 9 : Test de gemmologie classique de l'échantillon AB05



Figure 120 : Concrétions de cristobalite dans une améthyste du Colorado, USA.
Source : Gübelin & Koivula (2005).

La cristobalite est un polymorphe de SiO_2 , elle se forme aux alentours de 1470°C , mais la forme basse température existe aussi. Son système cristallin est cubique. Le quartz se forme à environ 570°C , la cristobalite peut-elle croître simultanément avec le quartz?

D'après Gübelin & Koivula (2005), page 555, ces inclusions seraient certainement protogénétiques. Il s'agirait de concrétions de cristobalite et de fluorite entremêlées (figure 120), le centre de ces concrétions serait creux et en partie rempli d'oxydes de fer.

Apparemment, la cristobalite aurait été identifiée dans des améthystes en provenance du Colorado USA, en Argentine ainsi qu'en Uruguay (Gübelin & Koivula, 2005).

Observation des inclusions au microscope

Cette améthyste comporte trois inclusions bien formées et de bonnes dimensions. La photo ci-contre, de l'inclusion N°1 (figure 121) est prise en lumière réfléchie avec un grossissement de 25 x. C'est l'inclusion principale, elle mesure environ 6,6 mm de long. Cette inclusion est creuse, elle comporte en surface des produits oxydés couleur rouille. Elle se présente en agrégats de grains cryptocristallins.

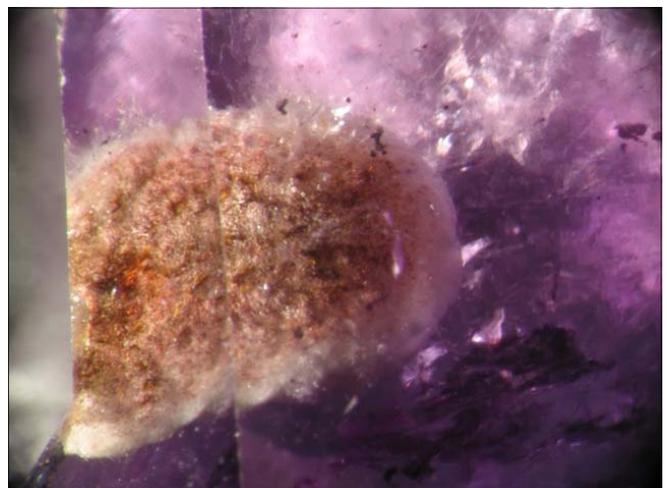


Figure 121 : Inclusion N°1 : grossissement de 25 x.
L'inclusion principale est creuse et présente en surface des produits oxydés couleur rouille.
Elle mesure environ 6,6 mm de long.



Figure 122 : Inclusion N°2
Le pourtour de l'inclusion est blanc,
la surface est pigmentée de petites taches brunes.

La figure 122 présente une deuxième inclusion, la photo a été prise en lumière réfléchie avec un grossissement de 63 x. Cette inclusion mesure 5,4 mm de long, le pourtour est blanc et la surface est pigmentée de petites taches brunes. L'aspect général est sensiblement identique à celui de l'inclusion précédente (voir figure 121).

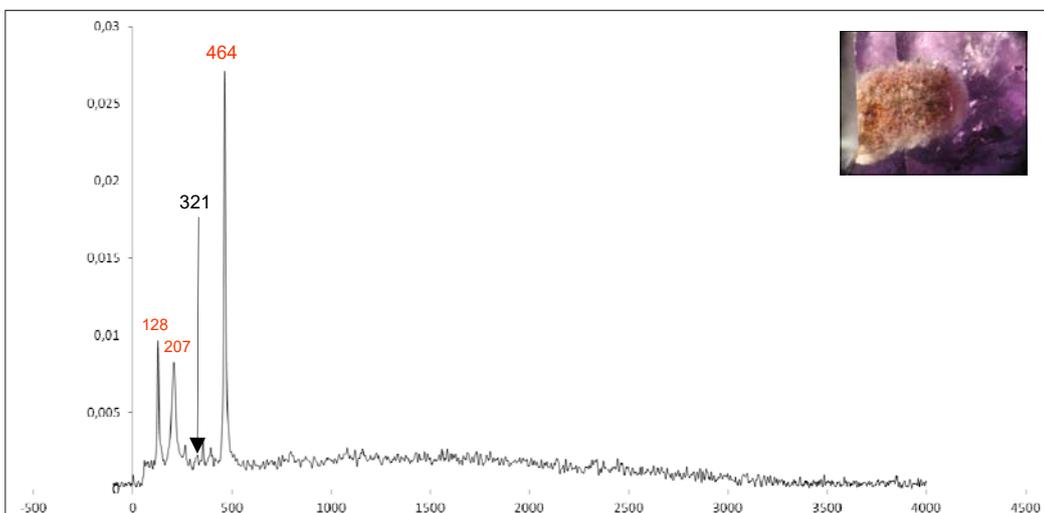


Figure 123 : Inclusion N°4, grossissement de 25 x.
L'inclusion n'est pas creuse,
mais complètement cristallisée.

La photo ci-contre (figure 123) révèle la coupe transversale d'une quatrième inclusion. Contrairement à l'inclusion N°1 (figure 121), celle-ci n'est pas creuse, mais complètement cristallisée. L'idéal serait de pouvoir prélever un échantillon afin de l'analyser au MEB.

Tests Raman

Plusieurs tests sont pratiqués sur le FT Raman Brucker. Le premier concerne l'inclusion N°2 (figure 122), le signal est faible. Le deuxième spectre (figure 124) obtenu à partir de l'inclusion N°1 est exploitable, hormis les pics du quartz, il est composé d'une seule vibration à 321 cm^{-1} .



Pic principal

321

Pics du quartz

128

207

354

464

Figure 124 : En plus des pics du quartz (128, 207, 354 et 464 cm^{-1}) on ne voit qu'un seul pic à 321 cm^{-1} qui correspond au minéral fluorite.

Nous avons également effectué d'autres tests de l'échantillon AB05 sur le Raman dispersif T64000. Les résultats obtenus corroborent nos premières conjectures. La vibration fondamentale à 321 cm^{-1} nous permet d'identifier l'inclusion, il s'agit de la fluorite.

Le spectre de référence issu de la banque de données RRUFF (figure 125) est explicite. Il n'y a aucune confusion possible entre les spectres Raman de la fluorite et de la cristobalite. Le pic attendu pour la fluorite est à 321 cm^{-1} , la cristobalite à deux pics distincts à 228 et 416 cm^{-1} .

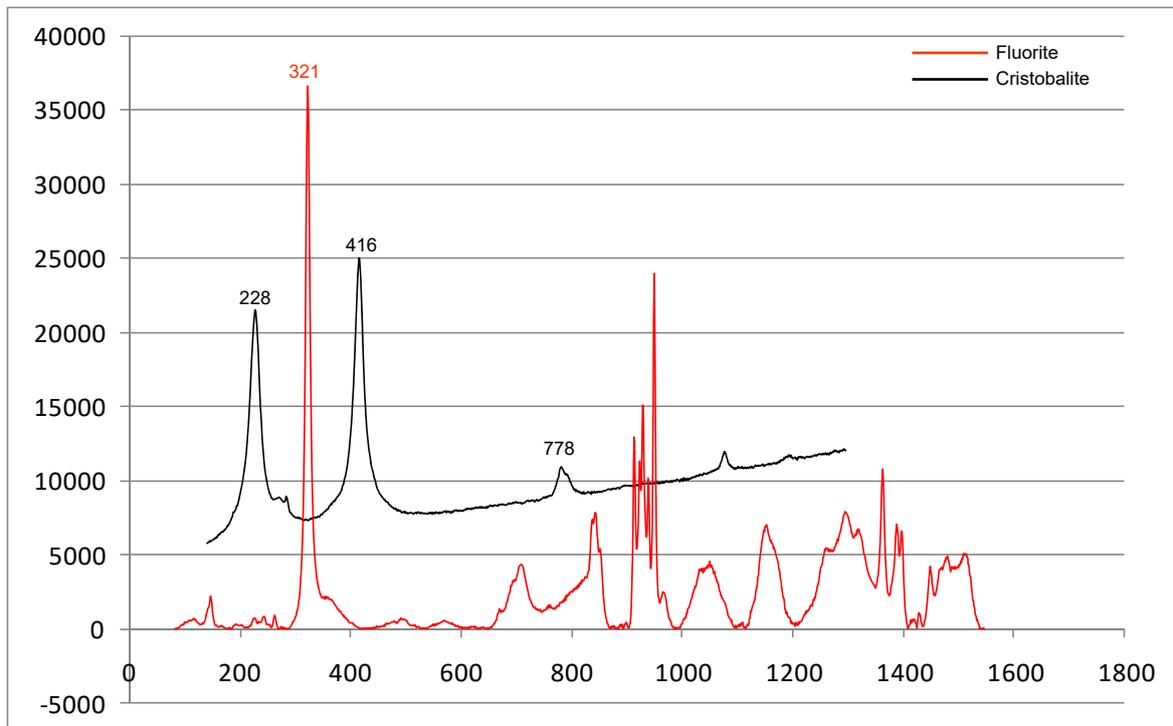


Figure 125 : Spectre Raman comparatif, fluorite R040099-3 et cristobalite R060648 source : www.ruff.info

Observation et analyses au MEB

Un fragment a été prélevé afin de l'analyser au MEB. Trop fin et délicat, il n'a pas pu être poli. Malheureusement, il a basculé du porte-échantillon lors de la métallisation.

Discussion :

D'après Gübelin & Koivula (2005), ces concrétions seraient de la cristobalite et de la fluorite entremêlées. À chaque stade de nos investigations, nous n'avons pas détecté la présence de cristobalite, tout du moins pour cet échantillon. Ces résultats viennent étayer les arguments du Professeur E. Fritsch, soutenant l'improbabilité d'une présence de cristobalite en inclusion dans le quartz.

Conclusion : Quartz à inclusions de fluorite

AB06

Description

Cette améthyste a été achetée dans le cadre du DUG. Elle a été vendue comme étant une améthyste à inclusions de cristobalite en provenance du Brésil.



Figure 126 : échantillon AB06 à inclusions dites de "cristobalite"

Polariscope	rétablit la lumière tous les 90° sauf dans l'axe optique		
Commentaire	couleurs d'interférence très fortes		
Indice de réfraction	No	Ne	Biréfringence
	1.542	1.551	0.009
Luminescence	U.V.C	U.V.L	
	inerte	inerte	
Densité	2.624		
Résultat	quartz variété améthyste		

Tableau 10 : Test de gemmologie classique de l'échantillon AB06



Figure 127 : Concrétions blanches de fluorite dans une améthyste en provenance d'Artigas, Uruguay.
Source : (Hyrsl & Niedermayr, 2003)

Observation des inclusions au microscope

La photo ci-contre (figure 128) a été prise en lumière réfléchie avec un grossissement de 15 x. Cette améthyste contient quatre inclusions sphéroïdes dont une double, chaque nodule mesure environ 1,4 mm de diamètre. Ces concrétions ont une structure extérieure fibreuse et radiale. La couleur est blanchâtre.

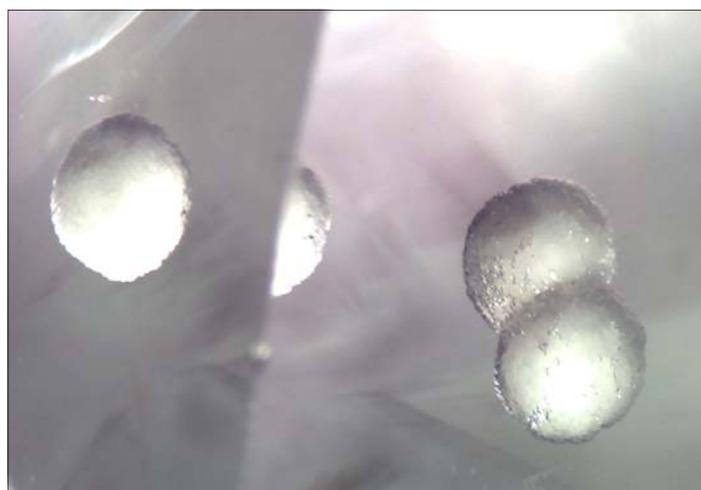
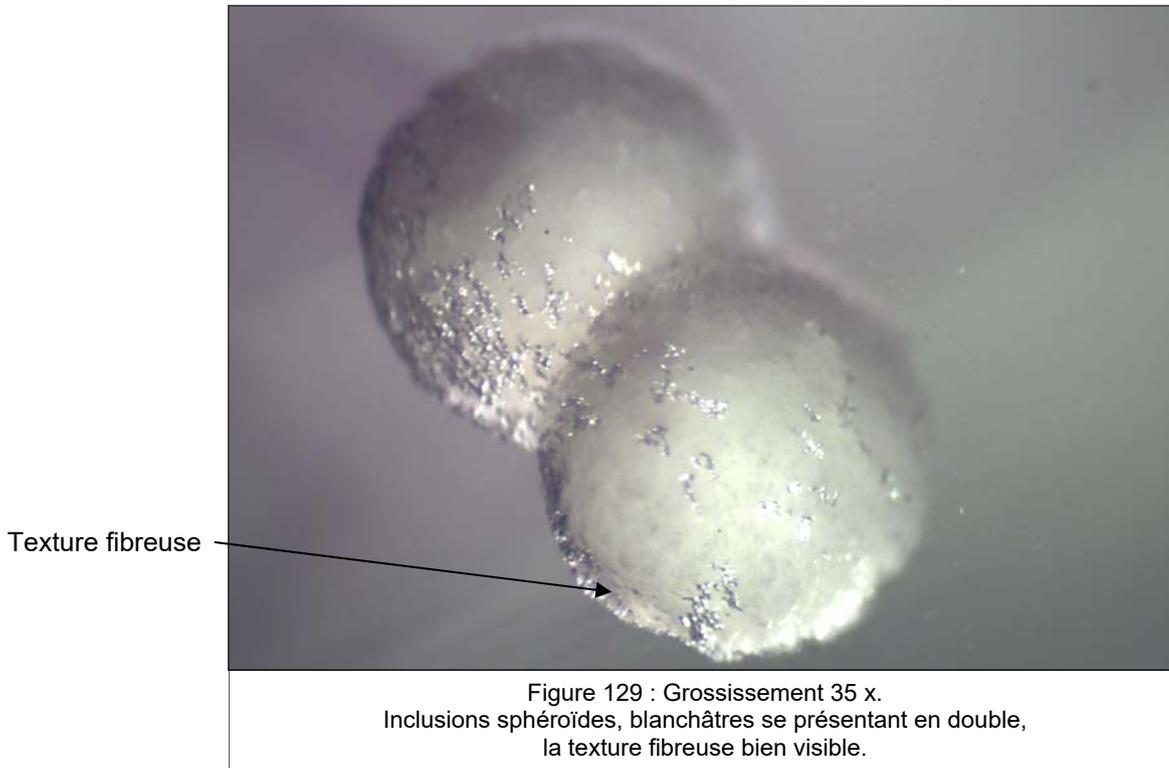
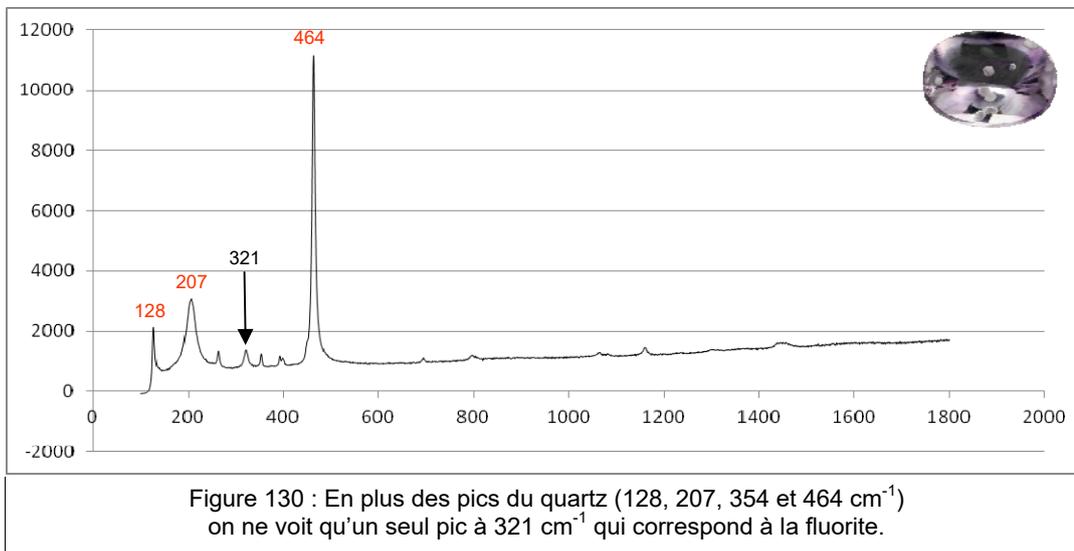


Figure 128 : Grossissement de 15 x.
Concrétions blanches dont la structure est fibreuse.



Tests Raman

Ce spectre (figure 130) a été réalisé avec le Raman HORIBA T6400, ce spectre a été obtenu avec un temps d'acquisition de deux fois 60s. Il laisse apparaître une seule vibration à 321 cm^{-1} en plus de celles du quartz, elle correspond à la fondamentale du minéral fluorite (voir spectre de la figure 125 de l'échantillon précédent).



Pic principal

321

Pics du quartz

128

207

354

464

Discussion :

Ces concrétions sont complètement différentes de celles de l'échantillon AB05 étudiées précédemment. C'est encore un exemple où la fluorite peut revêtir un habitus inhabituel et notamment en inclusion dans le quartz. Cependant, la fluorite en boule est connue dans les environnements volcaniques (Comm. Pers., E. Fritsch, 2015). La figure 131 présente une boule de fluorite issue de la mine De an, Wushan, Jiangxi Province en Chine.

Nous pouvons conclure:

Améthyste à inclusions de fluorite.



Figure 131 : Boule de fluorite, Wushan, Jiangxi Province, Chine
Source : www.irocks.com

AB07

Description

Cet échantillon a été acheté à Mr Mauro Pantò en Italie comme étant un quartz à inclusions de covellite en provenance du Brésil. Il est incolore et transparent.

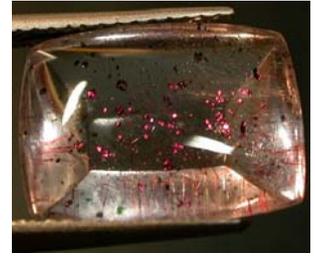


Figure 132 : échantillon AB07 à inclusions dites de "covellite"

Polariscope	rétablit la lumière tous les 90° sauf dans l'axe optique		
Indice de réfraction	No	Ne	Biréfringence
	1.542	1.551	0.009
Luminescence	U.V.C	U.V.L	
	violet	violet	
Densité	2.634		
Résultat	quartz		

Tableau 11 : Test de gemmologie classique de l'échantillon AB07



Figure 133 : Minéral covellite.
Source: www.dakotamatrix.com

Le minéral covellite (CuS) est un sulfure de cuivre, il cristallise dans le système hexagonal. Il peut avoir dans sa composition chimique quelques traces de fer. Les cristaux (figure 133) sont généralement opaques à translucides de couleur bleu indigo à violet. L'habitus en petites plaquettes hexagonales aplaties est très rare (Hatert, 2013). La covellite se rencontre généralement en agrégats de grandes lamelles ou en masses grenues à compactes. La covellite a un pléochroïsme marqué, bleu foncé à bleu pâle à orange, une biréfringence élevée et une dispersion forte. C'est un matériau hautement iridescent (mindat.org).

Observation des inclusions au microscope

Cet échantillon comporte une concentration importante de petits cristaux à l'habitus tabulaire jumelés à des aiguilles rouge vif éparpillées dans l'ensemble de la pierre. Ces petites plaquettes pseudo-hexagonales sont orientées dans des plans parallèles (figure 134). Les plaquettes ont un fort éclat métallique et présentent des reflets miroitants ou effet "Schiller".

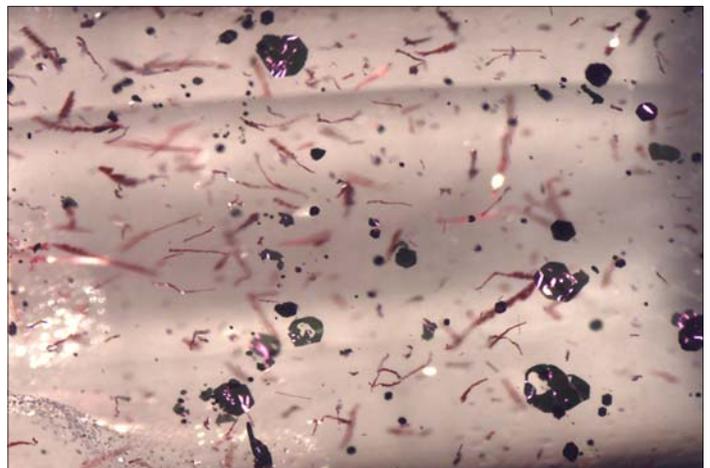


Figure 134 : Grossissement de 25 x.
Nombreuses plaquettes pseudo-hexagonales au fort éclat métallique.

La covellite est un sulfure de cuivre opaque, en inclusions dans le quartz les plaquettes sont si fines (figure 136) qu'elles sont translucides à transparentes (Quinn et al., 2005). En variant la source d'éclairage, une autre particularité a été observée, les plaquettes sont pourpres en lumière réfléchie et deviennent vertes en lumière transmise (Fleischer et al., 1984). C'est la couleur complémentaire, donc c'est normal (Comm. Pers. E. Fritsch, 2015).

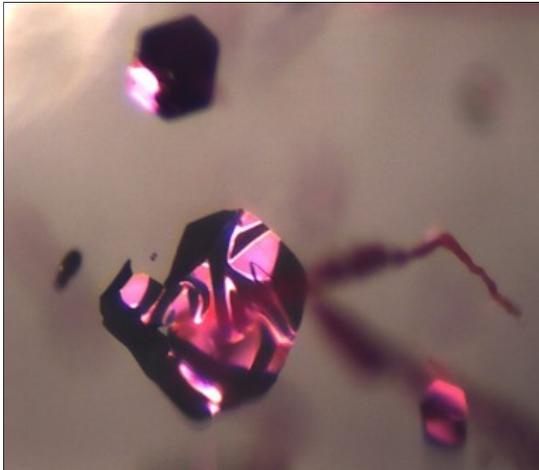


Figure 135 : Grossissement 30 x.
Photo prise en lumière réfléchie, l'inclusion est pourpre, l'éclat métallique est bien visible.

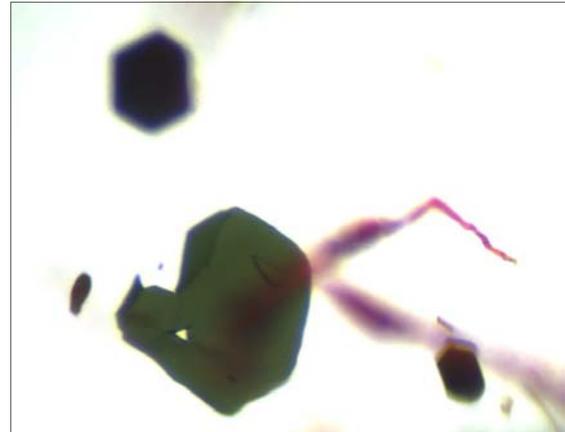


Figure 136 : Grossissement 35 x.
Photo prise en lumière transmise, l'inclusion est verte et translucide.

Certaines d'entre elles se présentent en couches extrêmement minces et montrent un phénomène d'interférence observé en lumière réfléchie, entre polariseurs croisés (figures 137 et 138).

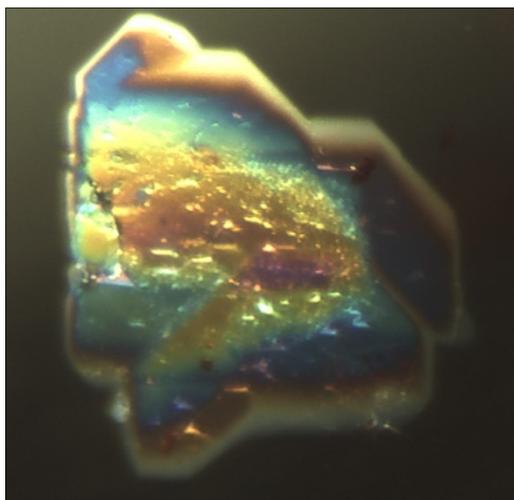


Figure 137 : Grossissement 40 x.
Phénomène d'interférence vu au microscope avec un polariscope de poche.

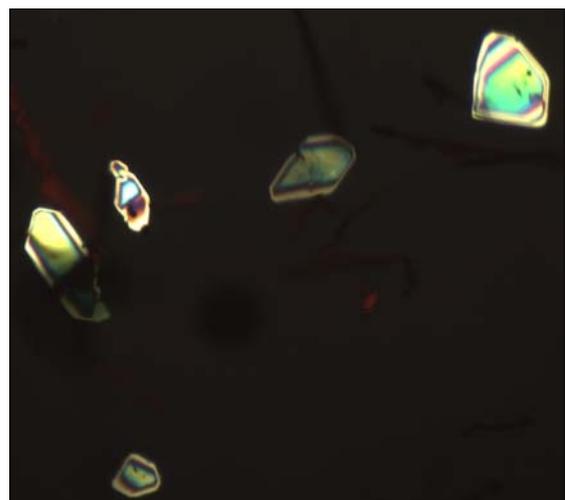
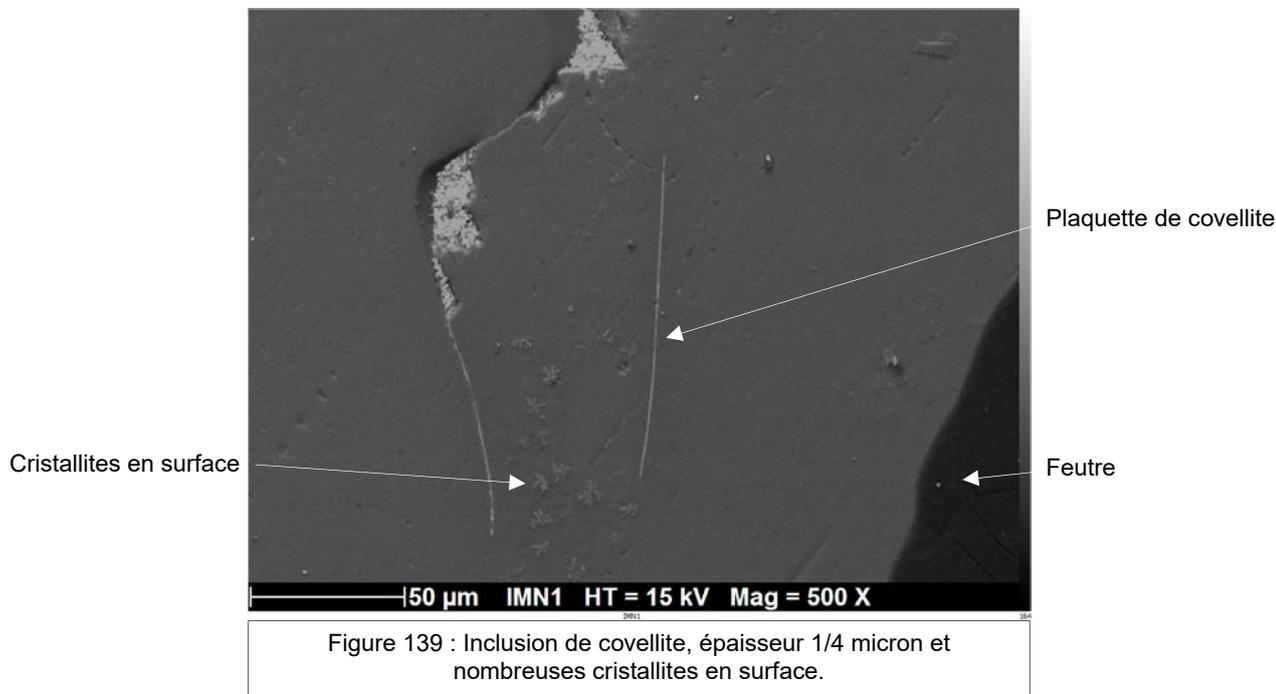


Figure 138 : Grossissement 30 x.
Phénomène d'interférence vu au microscope avec un polariscope de poche.

Observation et analyses au MEB

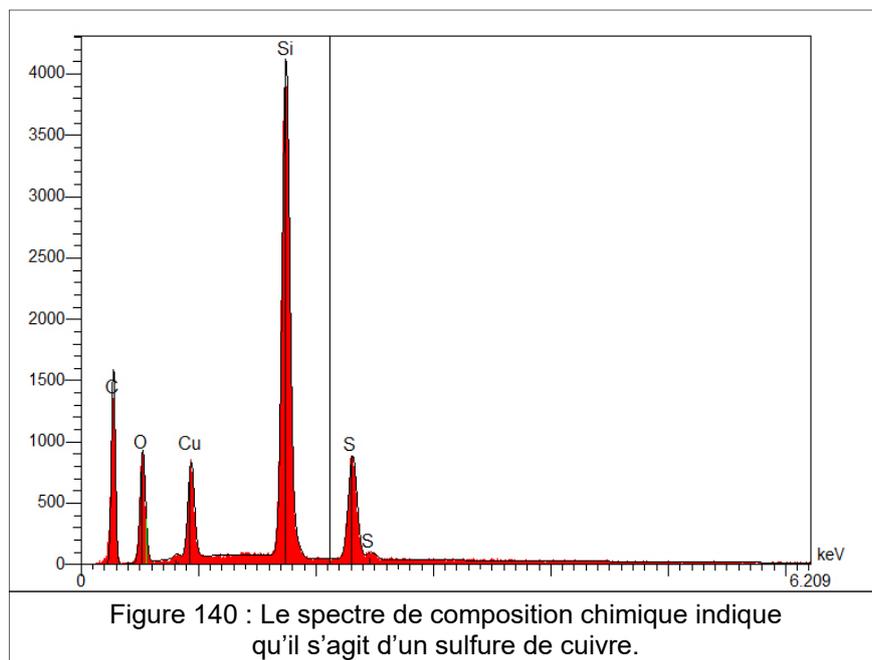
La recherche de l'inclusion a été longue et laborieuse, nous essayons de trouver une plaquette hexagonale. Nous avons effectué un balayage lent afin d'avoir plus de contraste entre l'inclusion et le quartz. La plaquette recherchée est en fait une ligne dont l'épaisseur est approximativement d'un 1/4 de micron (figure 139). L'Image a été obtenue en électrons secondaires SE.



L'analyse quantitative n'est pas exploitable. Le spectre de composition chimique (figure 140) indique que l'inclusion est un sulfure de cuivre. L'analyse quantitative aurait dû fournir les % suivants (2001-2005 Mineral Data Publishing) :

Cu	66.06
S	33.87
Fe	0.14

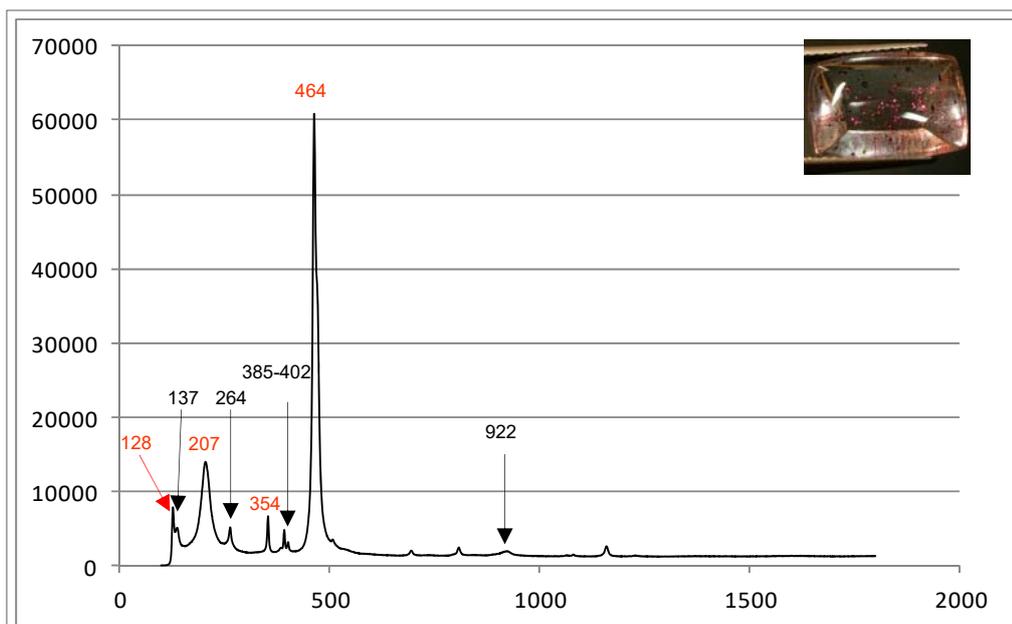
L'oxyde de silicium SiO_2 est présent, il s'agit de la matrice. L'élément carbone correspond à la métallisation.



Tests Raman

Le premier test a été effectué sur le FT Raman BRUKER RFS 100, les vibrations obtenues correspondent aux pics du quartz : 126, 203, 260, 356, 464, 808 et 1158 cm^{-1} . Un doublet à 384-402 et deux pics à 510 et 1082 cm^{-1} peuvent évoquer un autre matériau. Il serait préférable de refaire un deuxième test Raman sachant que l'inclusion étant très probablement un sulfure opaque, il y a des problèmes de chauffe.

Le deuxième test est pratiqué sur le Raman T64000 avec un temps d'acquisition de 2 fois 60s, le signal est encore faible (figure 141). Le spectre obtenu donne des pics à 137, 385 et 402 cm^{-1} ainsi qu'un épaulement à 502 cm^{-1} . On peut également observer une bande située à 922 cm^{-1} . Le pic à 264 cm^{-1} est non discriminant, la covellite montre un pic à 260, mais aussi le quartz à 264 cm^{-1} .



Pics principaux

137
264

Doublet

385-402

Bande

922

Pics du quartz

128
207
354
464

Figure 141 : Spectre Raman montrant des pics à 137, 264 cm^{-1} , un doublet à 385-402 cm^{-1} ainsi qu'une bande située à 922 cm^{-1} .

Ces inclusions sont si fines que la surface à analyser est ténue. Malgré tout, le spectre Raman donne un pic à 137 cm^{-1} et une bande à 922 cm^{-1} concordant au spectre RRUFF R060306-3 (figure 142).

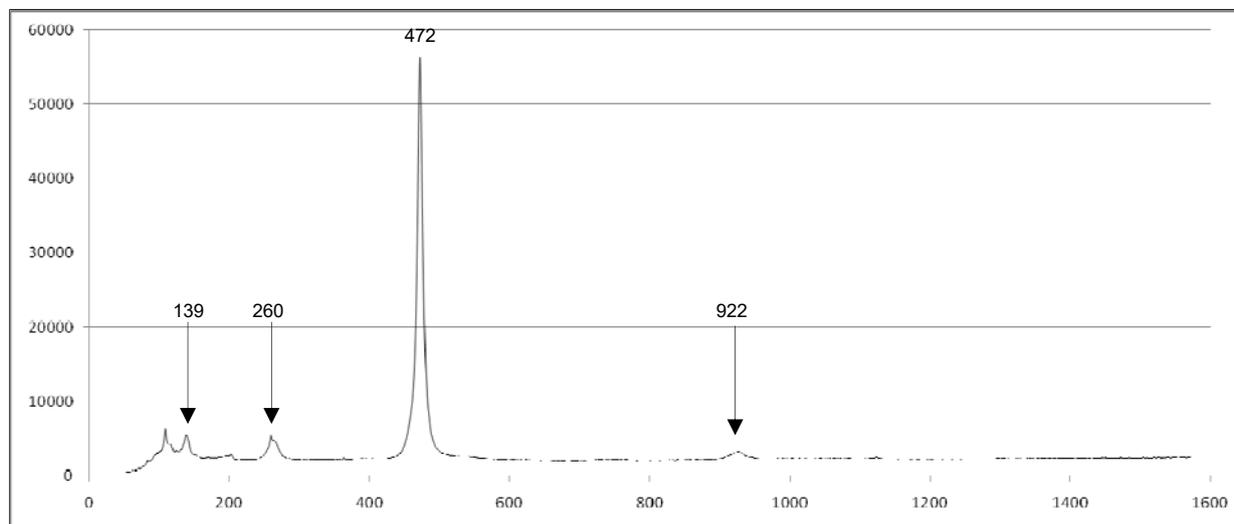


Figure 142 : Spectre Raman de la covellite R060306-3
Source : www.ruff.info

La photo (figure 143) a été prise au microscope KEYENCE VHX 5000 avec un grossissement de 500 x. À cet agrandissement, l'hématite présente un habitus peu courant. Les aiguilles aciculaires observées à la loupe ont laissé place à de fines plaquettes losangiques orientées perpendiculairement à un axe central, la terminaison est en forme de cloche.

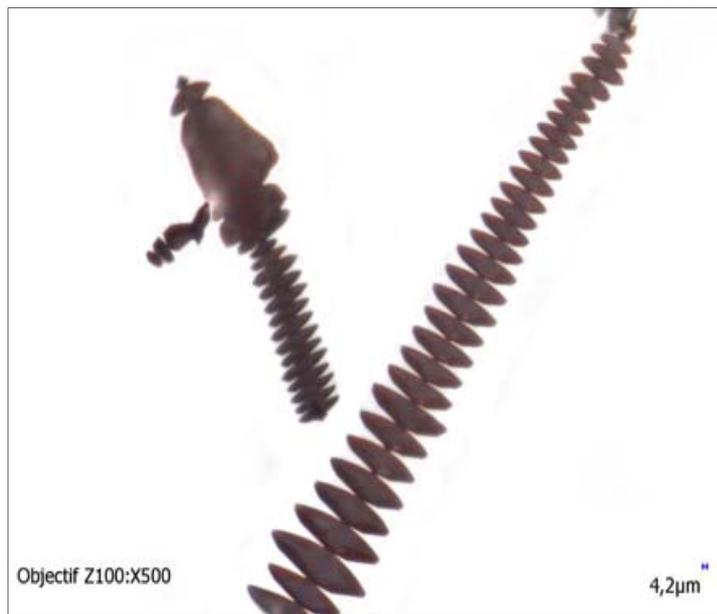
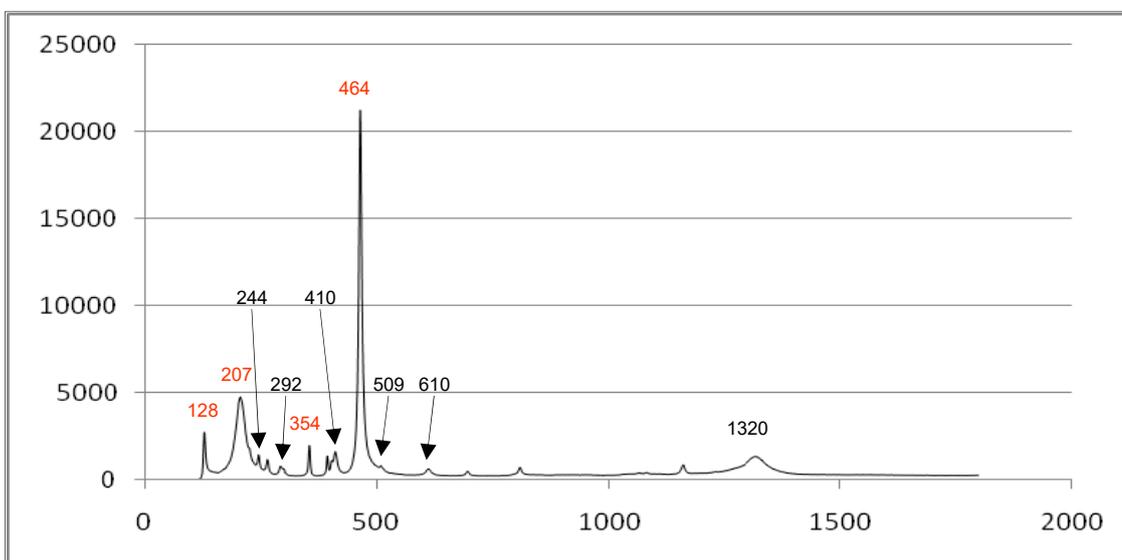


Figure 143 : Arrangement structuré de fines plaquettes losangiques d'hématite, terminaison en forme de cloche.

Le troisième spectre concerne cette inclusion rouge (figure 143), il a été réalisé avec un temps d'acquisition de 2 fois 60s. Les pics obtenus sont à 244, 292, 509 et 610 cm^{-1} , on observe une bande large à 1320 cm^{-1} et un pic significatif à 410 cm^{-1} . Nous sommes en présence d'inclusions d'hématite (voir spectre RRUFF, figure 195, page 67).



Pics principaux

244
292
410
509
610

Pics du quartz

128
207
354
464

Figure 144 : Spectre Raman présentant des pics à 244, 292, 509 et 610 cm^{-1} , une bande large à 1320 cm^{-1} et un pic significatif à 410 cm^{-1} .

Discussion :

L'échantillon présente une fluorescence violette aux UVC ainsi qu'aux UVL. Le quartz monocristallin est généralement inerte aux UVC et aux UVL, mais une réaction peut être provoquée par des inclusions fluides ou solides (gemmo.eu). La covellite ne présente pas de fluorescence non plus (mindat.org/covellite), il s'agit probablement de la réflexion de la lampe. Le spectre de composition chimique indique qu'il s'agit d'un sulfure de cuivre, le Raman confirme la présence de la covellite dans ce quartz.

Conclusion : Quartz à inclusions de covellite et d'hématite.

AB08

Description

Cet échantillon a été acheté au salon de Tucson, sa provenance géographique est le Brésil. La particularité de cette pierre est sa couleur grise dominante causée par une profusion d'aiguilles qui reste à identifier.



Figure 145 : échantillon AB08

Polariscope	rétablit la lumière tous les 90° sauf dans l'axe optique		
Indice de réfraction	No	Ne	Biréfringence
	1.544	1.553	0.009
Luminescence	U.V.C	U.V.L	
	inerte	inerte	
Densité	2.722		
Résultat	quartz		

Tableau 12 : Test de gemmologie classique de l'échantillon AB08

Les inclusions aciculaires dans le quartz sont relativement courantes, les aiguilles grises à l'éclat métallique sont beaucoup plus rares. Hyrsl & Niedermayr (2003) ont recensé quelques minéraux à l'habitus aciculaire et de couleur argentée susceptibles de se trouver en inclusions dans le quartz :

- Boulangerite : un sulfure de plomb et d'antimoine de formule $Pb_5Sb_4S_{11}$, de système monoclinique.
- Bismuthinite : un sulfure de bismuth de formule Bi_2S_3 , de système cristallin orthorhombique.
- Cosalite : un sulfure de plomb et de bismuth de formule $Pb_2Bi_2S_5$, de système orthorhombique.
- Rutile : un dioxyde de titane de formule TiO_2 et de système cristallin quadratique.

Observation des inclusions au microscope

En lumière réfléchi, l'éclat de ces inclusions rend la prise de vue difficile (figure 146). Manifestement, ces solides se caractérisent par un indice de réfraction élevé. L'inclusion est composée d'un tissage de longues et fines aiguilles à l'éclat sub-métallique disposées dans la quasi-totalité de la pierre. Elles sont orientées dans trois directions et présentent une structure réticulaire. On peut observer également de nombreux cristaux négatifs à deux phases.

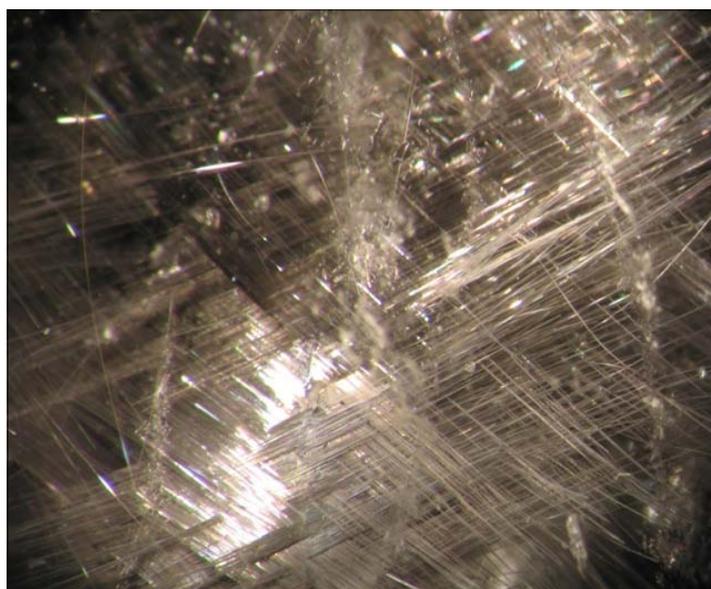


Figure 146 : Grossissement 63 x.
Tissage de longues et fines inclusions à l'éclat submétallique, elles présentent une structure réticulaire.

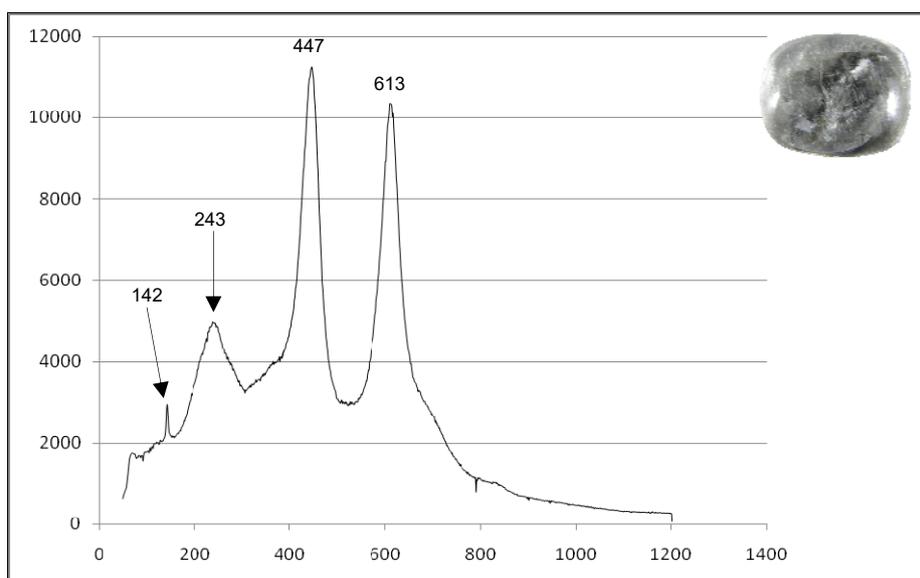


Figure 147 : Grossissement 70 x.
Les aiguilles sont étroitement enchevêtrées les unes dans les autres.

Tests Raman

Un premier test a été pratiqué au Raman Horiba LabRam 300 mais il n'a pas donné de spectre significatif. Le second spectre a été obtenu avec un temps d'acquisition de 5 secondes avec trois accumulations. On a utilisé l'option spectral windows avec les paramètres suivants : de 500 à 1200 avec un temps de 100% afin de modifier la durée d'exposition relative (en %) de chaque fenêtre. Cette valeur est utilisée pour compenser les différences de niveau de signal.

Les résultats recueillis lors de ce test (figure 148) montrent un pic à 142 cm^{-1} , un pic plus large à 243 cm^{-1} et deux pics principaux à 447 et 613 cm^{-1} .



Pics principaux

142
447
613

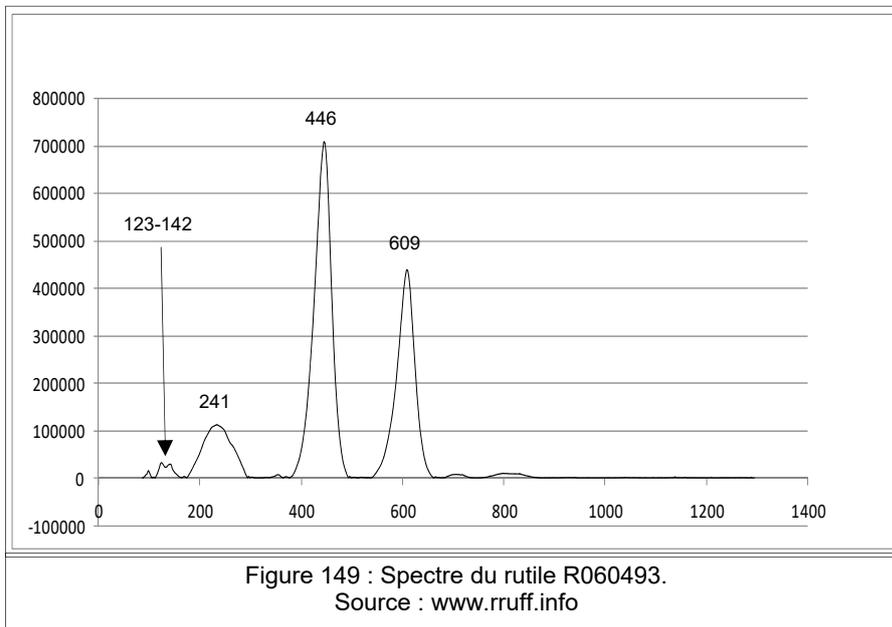
Bande large

243

Figure 148 : Spectre Raman donnant des pics à 142 , 447 et 613 cm^{-1} et une bande large à 243 cm^{-1} .

Les pics obtenus (voir spectre de la figure 148) sont très similaires à ceux de la banque de données RRUFF (figure 149), tous les pics de vibration du rutile sont présents.

Parmi les trois polymorphes de TiO_2 (rutile, anatase, brookite), le spectre du rutile est caractéristique par la largeur de sa bande à 250 cm^{-1} due à une transition à 2 phonons (Pighini C, 2006) et par ses massifs hauts et larges (AFG, 1992, La Microsonde Raman en Gemmologie). Notre spectre (figure 148) possède toutes ces caractéristiques.



Pics principaux	
446	
609	
Doublet	
123-142	
Bande large	
241	

Discussion :

L'échantillon n'a pas été préparé pour un examen au MEB, mais les résultats obtenus au Raman sont suffisants pour conclure. Le rutile cristallise dans le système quadratique, il se présente souvent en cristaux à l'habitus prismatique. Les cristaux généralement rouge sombre sont striés parallèlement à l'axe C. Le rutile peut être maclé, macle en genou ou macle en cœur. En inclusion dans le quartz, on le rencontre :

- Sous forme d'aiguilles (rutile aciculaire) dorées ou argentées à l'éclat sub-métallique à adamantin, mais aussi de couleur rouge à rouge sombre presque brun. Généralement longues et fines, elles sont orientées aléatoirement.

- Sous forme d'étoile, des agrégats aciculaires rayonnants (six branches) à partir d'un noyau central d'hématite-ilménite (Gübelin & Koivula, 2005) et exceptionnellement en étoile à six branches (figure 150) formée par des fibres de rutile à partir de trois lames individuelles de brookite disposées à 60° les unes des autres (Koivula, 2006).

- Sagénite (figure 151 et 152) doit son nom en 1796 au minéralogiste suisse Horace Benedict de Saussure, dérivé du latin sagena, il signifie filet. Les aiguilles de rutile se croisent ordinairement sous les mêmes angles, de manière à former des réseaux dont les mailles sont des parallélogrammes, on peut également l'appeler rutile réticulé.

Les inclusions de notre échantillon présentent cet arrangement appelé "sagénite ou réticulé", mais y a-t-il un rapport étroit entre cet arrangement et celui de l'inclusion dite en peigne ou "platinum quartz" de l'échantillon AB02 page 28?



Figure 150 : Platinum quartz avec étoile de rutile.
Photo de J. Koivula.



Figure 151 : Quartz à inclusions de rutile sagénite brun orangé.
Photo de J. Koivula.



Figure 152 : Quartz à inclusions de rutile sagénite vert.
Photo de R. McMurtry.

Conclusion: Quartz à inclusions de rutile sagénite.

AB09

Description

Cet échantillon de quartz incolore, mais légèrement fumé a été acheté sur e-bay à un vendeur chinois, sa provenance géographique est inconnue, peut-être la Chine.



Figure 153 : échantillon AB09

Polariscope	rétablit la lumière tous les 90° sauf dans l'axe optique		
Indice de réfraction	No	Ne	Biréfringence
	1.545	1.554	0.009
Luminescence	U.V.C	U.V.L	
	inerte	jaune	
Commentaire	fluorescence de l'inclusion blanc jaunâtre aux UVL		
Densité	2.646		
Résultat	quartz		
Tableau 13 : Test de gemmologie classique de l'échantillon AB09			

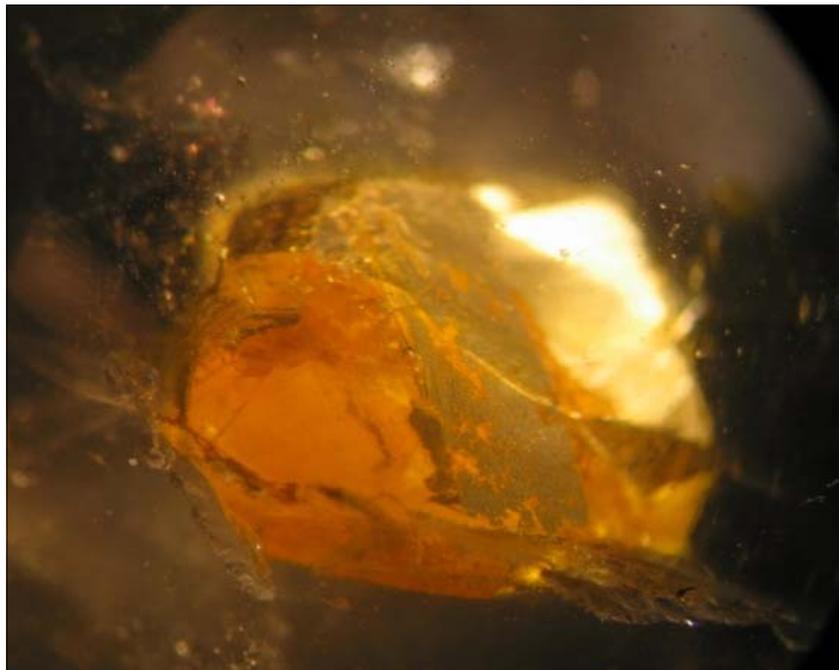


Figure 154 : Grossissement 63 x.
Cristal automorphe mesurant environ 10x7 mm.
La forme est trapue, certaines faces ont des arêtes encore vives.

Observation des inclusions au microscope

Ce cristal (figure 154) présent dans la gemme se caractérise par un habitus prismatique et une forme plus ou moins trapue. La couleur de ce cristal est jaune-orangé et inhomogène. Il mesure environ 10x7mm. On peut observer des arêtes encore vives, certaines faces de ce prisme présentent des faces inclinées à la partie supérieure, cet indice permet de penser à une possible symétrie monoclinique. On peut distinguer également des plans de clivage qui semblent être parfaits dans une direction avec une surface à l'aspect miroitant.

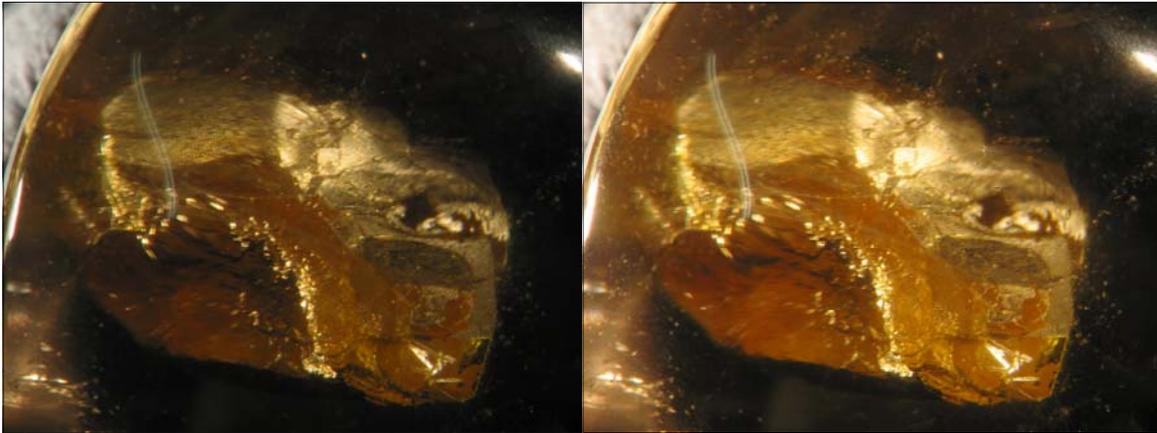


Figure 155 : Grossissement 63 x.
Photo prise au microscope Leica
avec filtres polarisants.

Figure 156 : Grossissement 63 x.
Photo prise au microscope Leica
sans filtres polarisants.

L'inclusion a été observée avec un polariscope de poche posé directement sur la platine du microscope GEM SET. En tournant la pierre, nous constatons que l'inclusion rétablit la lumière tous les 90°, ce test permet de révéler l'anisotropie du matériau inclus. Les figures 155 et 156 présentent l'inclusion observée avec le microscope Leica avec et sans filtres polarisants.

Observations et analyses au MEB

Le spectre de composition chimique obtenu (figure 157) indique qu'il s'agit d'un sulfate de calcium. L'analyse quantitative est non exploitable, il ne sera pas possible d'avoir les pourcentages des éléments chimiques présents dans ce solide.

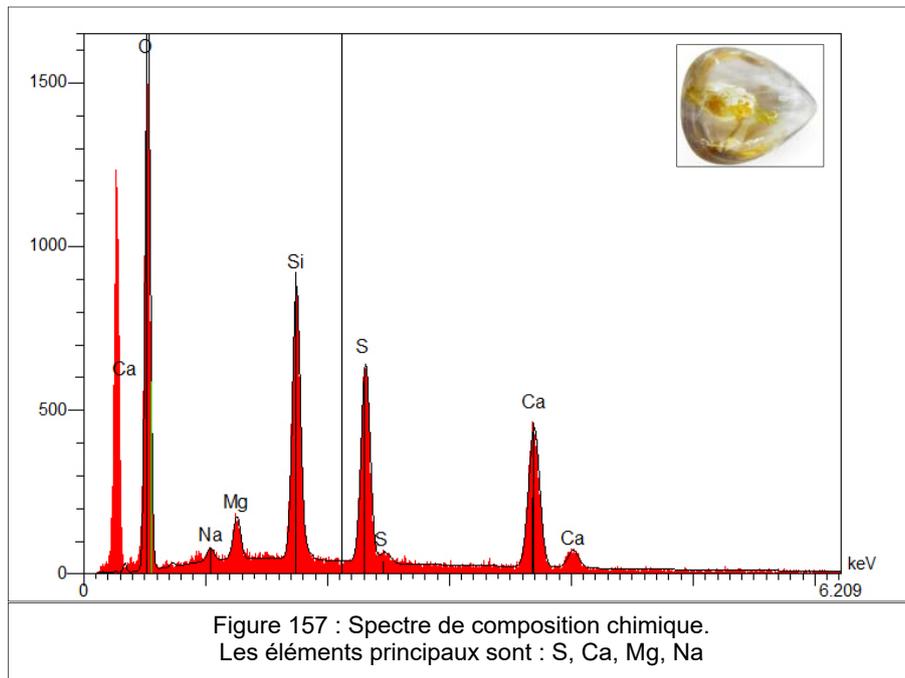


Figure 157 : Spectre de composition chimique.
Les éléments principaux sont : S, Ca, Mg, Na

Le sulfate de calcium se rencontre dans la nature principalement sous les deux formes suivantes :

- Hydraté : c'est le gypse, un minéral de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Généralement incolore, il cristallise dans le système monoclinique, il est connu pour ses macles (figure 159) en fer de lance ou encore en queue d'aronde (Gautier, 2014). Il peut être coloré par des impuretés (Pomerol & al, 2011).
- Anhydre : c'est l'anhydrite, l'équivalent anhydre du gypse de formule CaSO_4 , il cristallise dans le système orthorhombique. Issu des évaporites, ce minéral donne rarement des cristaux bien formés, on le rencontre plutôt en agrégats grenus ou fibreux (Gautier, 2014).

Tests Raman

L'échantillon a été analysé sur le Raman HORIBA T64000 avec un temps d'acquisition de 10s puis de deux fois 60s avec 35000 coups pour lisser le bruit. On a obtenu les pics de vibration suivants: 487, 619, 1006, 1147, 1174 et 1276 cm^{-1} et un doublet à 1584-1591 cm^{-1} . Ces données recueillies avant l'analyse au MEB, n'ont pas été tout de suite exploitables. Sachant postérieurement qu'il s'agissait d'un sulfate de calcium, nous avons comparé les pics de vibration obtenus à ceux du gypse de la base de données RRUFF (figure 158). Ils concordent et sont bien en faveur de ce minéral.

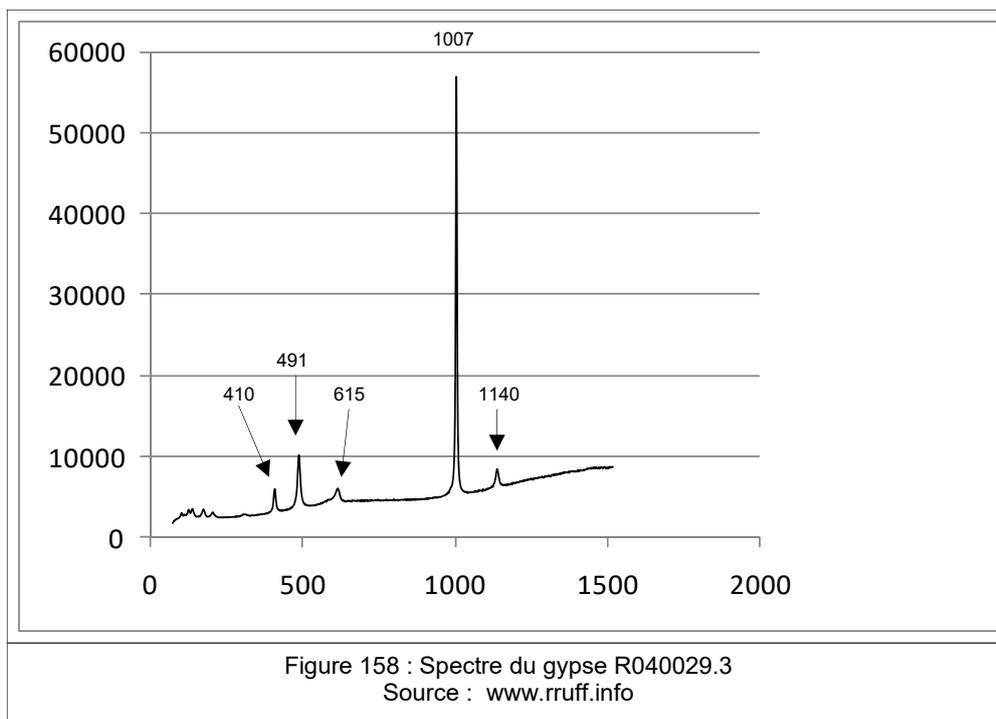


Figure 159 : Gypse, Red river Floodway, Manitoba, Canada
Source : www.minerals.net

Discussion :

La gemmologie classique a permis de mettre en évidence une anisotropie, une possible symétrie monoclinique ainsi qu'une faible luminescence blanc jaunâtre aux UVL (webmineral.com/gypsum), trois critères qui correspondent au gypse.

En effet, le gypse est un minéral fluorescent. Une étude a été réalisée sur quatre gypses de trois localités différentes présentant différentes couleurs de luminescence à savoir le jaune, le bleu et le blanc (Taga et al., 2011). L'activateur serait des substances organiques incluses dans les cristaux plutôt que des imperfections chimiques (atomes d'impuretés) se substituant au centre Ca.

L'analyse chimique EDS s'est révélée primordiale sachant qu'il s'agissait d'un sulfate de calcium, il a été possible ensuite de comparer les résultats obtenus au Raman et de trouver des concordances de pics par rapport au spectre de référence RRUFF (figure 158). Il eut été impossible d'identifier la nature exacte de ce solide inclus sans l'aide des instruments de gemmologie de laboratoire.

L'anhydrite est une inclusion plutôt rare que l'on rencontre principalement dans les quartz issus des fentes alpines. La présence de gypse en inclusion dans le quartz paraît encore plus exceptionnelle, mais elle a été confirmée dans un quartz en provenance de Gasteinertal dans les Alpes orientales en Autriche (Hyrsi & Niedermayr, 2003).

Conclusion : quartz à inclusion de gypse jaune-orangé.

AB10

Description

Ce quartz incolore a été acheté à Sainte-Marie aux Mines, il a été vendu comme un quartz à inclusions de tellure ou d'argent, sa provenance géographique est Madagascar.



Figure 160 : échantillon AB10 à inclusions dites de "tellure ou d'argent"

Polariscope	rétablit la lumière tous les 90° sauf dans l'axe optique		
Indice de réfraction	No	Ne	Biréfringence
	1.542	1.551	0.009
Luminescence	U.V.C	U.V.L	
	inerte	inerte	
Densité	2.606		
Résultat	quartz		

Tableau 14 : Test de gemmologie classique de l'échantillon AB10

L'argent natif est de couleur gris-argenté. Il se présente généralement en agrégats ramifiés et dendritiques, il peut aussi former des filaments arborescents. Occasionnellement, on peut rencontrer des cristaux cubiques ou octaédriques. Dans le quartz, les inclusions d'argent natif sont relativement rares. Des études ont été menées sur des spécimens provenant de la mine Alhambra au Nouveau-Mexique, USA. Plusieurs cristaux isolés de forme octaédrique étaient parfaitement formés dans les zones transparentes du quartz hôte. D'après J. Koivula (1992), ces inclusions d'argent natif seraient probablement syngénétiques.

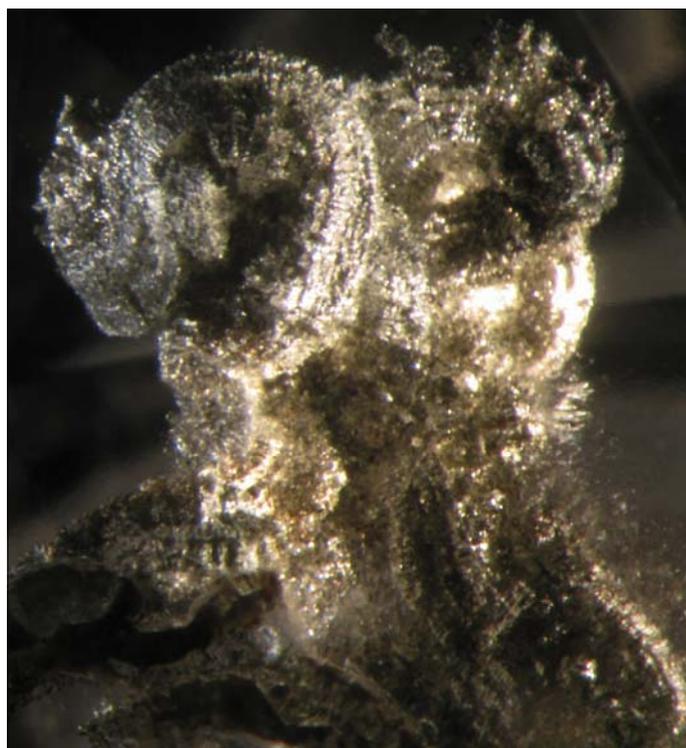
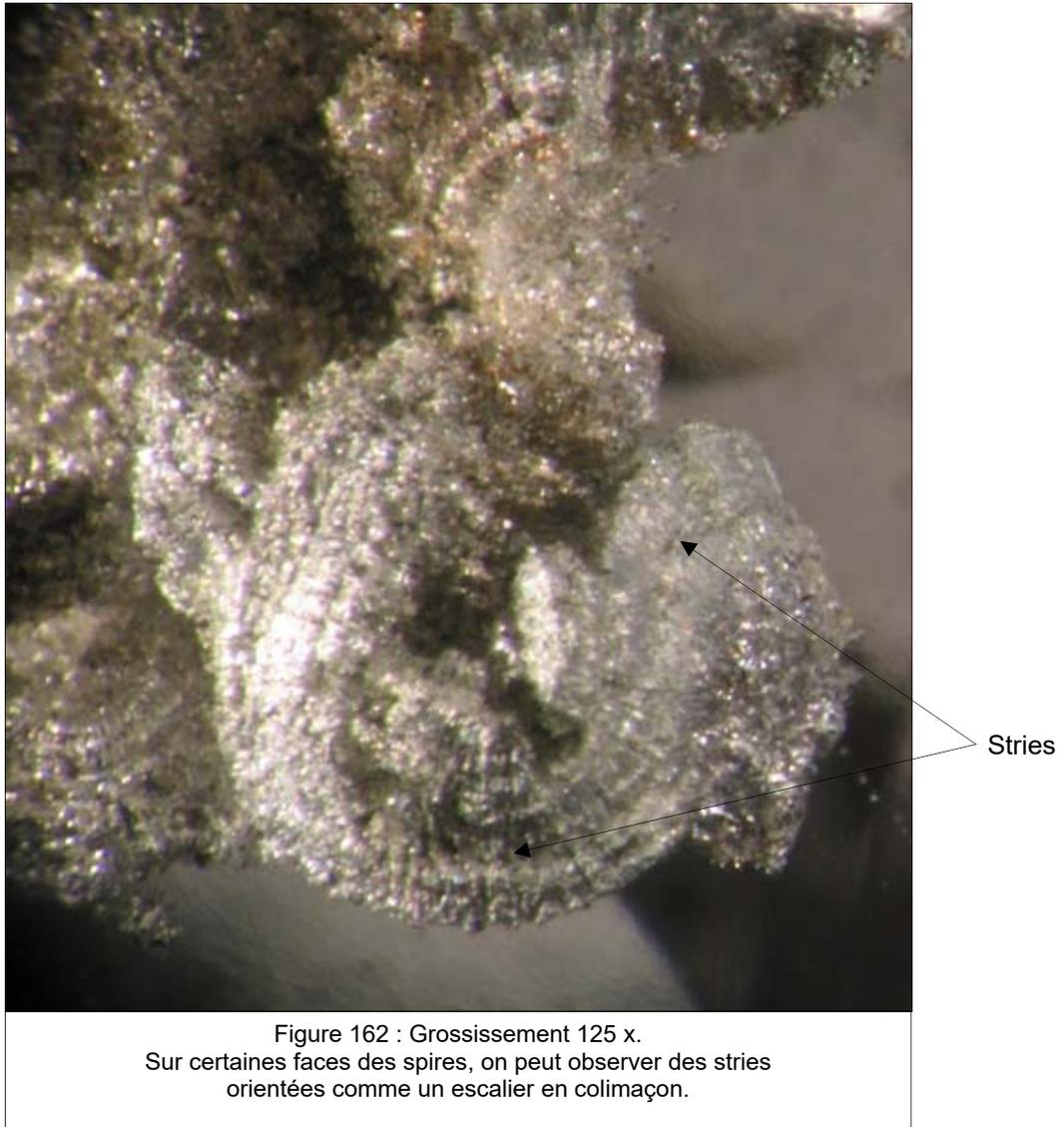


Figure 161 : Grossissement 80 x.
L'inclusion est opaque avec un fort éclat métallique.
La structure arborescente forme des spires aux extrémités.

Observation des inclusions au microscope

L'inclusion (figure 161) est relativement imposante, elle mesure environ 20,8x17,5 mm. Le solide inclus est opaque, de couleur gris-argenté avec un fort éclat métallique. L'inclusion se présente en agrégats à la structure arborescente dont les ramifications forment des spires aux extrémités. Sur certaines faces des spires, on peut observer des stries orientées comme un escalier en colimaçon (figure 162).



Tests Raman

Cet échantillon a été analysé à plusieurs reprises au Raman dispersif HORIBA T64000, aucun résultat n'a été obtenu, l'inclusion ne ramanise pas. Peut-on en déduire qu'il s'agit d'un élément natif sachant que les éléments métalliques ou semi-métalliques ne fournissent que des spectres peu exploitables? (AFG, 1992, la Microsonde Raman, page19).

Discussion :

La valeur de la pierre ne permet pas d'endommager l'échantillon pour prélever un fragment de l'inclusion afin de l'analyser au MEB ou en diffraction des rayons X (XRD). La forme comme décrite précédemment ainsi que l'éclat laisse penser qu'il pourrait s'agir d'argent natif.

Le tellure (figure 163) est manifestement à écarter de par sa structure cristalline hexagonale ainsi que sa rareté en inclusion dans le quartz. Il a été uniquement décrit au Japon. Quelques quartz issus de la mine Kawasu, préfecture de Shizuoka contiendraient des cristaux prismatiques de tellure natif de quelques centimètres de long (Hyrsl & Niedermayr, 2003).



Aucune conclusion possible.

AB11

Description

Ce quartz à inclusions de gilalite a été acheté dans le cadre du DUG, il provient du Brésil.



Figure 164 : échantillon AB11 à inclusions dites de "gilalite"

Polariscope	rétablit la lumière tous les 90° sauf dans l'axe optique		
Indice de réfraction	No	Ne	Biréfringence
	1.544	1.553	0.009
Luminescence	U.V.C	U.V.L	
	inerte	inerte	
Densité	2.611		
Pléochroïsme	les inclusions ne montrent aucun pléochroïsme		
Résultat	quartz		

Tableau 15 : Test de gemmologie classique de l'échantillon AB11

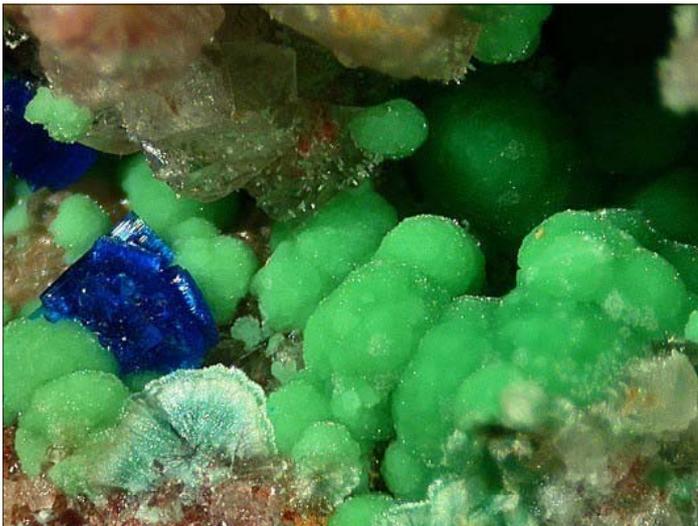


Figure 165 : Minéral gilalite
Source: www.mindat.org/gilalite



Figure 166 : Minéral apachite
Source: www.ruff.info

Gilalite (figure 165)

IMA: 1979-022

Formule chimique: $Cu_5Si_6O_{17} \cdot 7H_2O$

Système cristallin: monoclinique

Habitus: sphérules fibro-radiées

Couleur: est généralement de couleur verte mais, peut être bleu pâle dans certaines localités

Pléochroïsme: faible, vert à vert grisâtre terne

Spectre Raman: pas de spectre de référence, base de données RRUFF

Apachite (figure 166)

IMA : 1979-021

Formule chimique: $Cu_9Si_{10}O_{29} \cdot 11H_2O$

Système cristallin: monoclinique

Habitus: même habitus que la gilalite

Couleur: est généralement de couleur bleu foncé mais, peut être bleu pâle à verte, elle peut se confondre avec la planchéite ou la shattuckite

Pléochroïsme: non

Spectre Raman: spectre de référence, base de données RRUFF

En étudiant cet échantillon, j'ai voulu comprendre pourquoi la gilalite en inclusion dans le quartz pouvait être verte, bleu pâle à bleu foncé alors que généralement ce silicate de cuivre est vert.

S'agit-il vraiment de gilalite ou d'un autre minéral cuprifère?

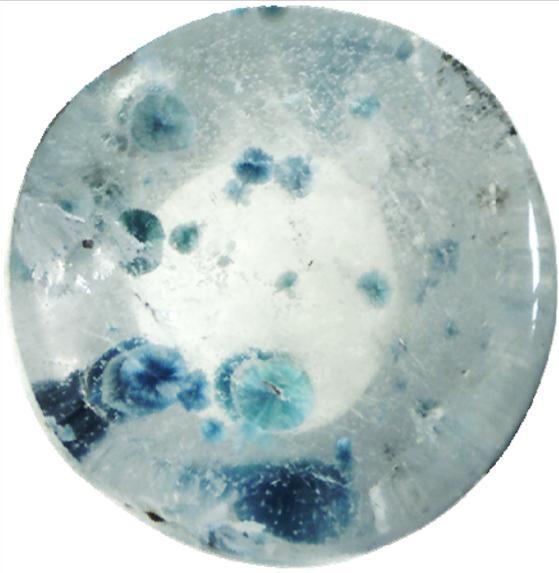


Figure 167 : Grossissement 15 x.
Agrégats fibro-radiés aux différentes nuances de bleu avec de vives zonations de couleur.

Observation des inclusions au microscope

La photo (figure 167) est prise en lumière transmise diffuse avec un grossissement de 15 x. Vues de face, ces inclusions se présentent en agrégats fibro-radiés. Elles ont différentes nuances de bleu allant du pâle au foncé. La couleur est hétérogène et souvent zonée.

La photo (figure 168) est prise avec un grossissement de 45 x. Vue de coté, on distingue parfaitement la forme botryoïdale de cette inclusion cristalline. Sa surface apparaît grenue, l'extrémité de l'inclusion se termine par une corolle fibro-radiée dont le centre est plus foncé que les bords.

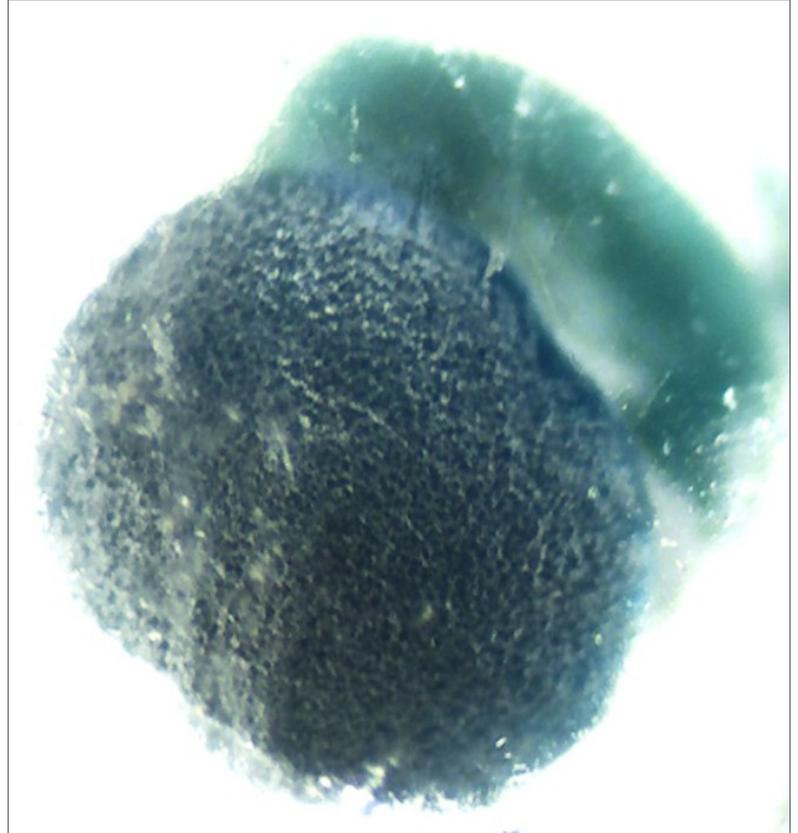


Figure 168 : Grossissement 45 x.
Inclusion à la forme botryoïdale, sa surface est grenue. L'extrémité de l'inclusion se termine par une corolle fibro-radiée dont le centre est plus contrasté que les bords.

Observation et analyses au MEB

L'échantillon a été analysé au MEB JEOL 5800LV, l'image (figure 169) a été obtenue en mode électron secondaire SE avec un grossissement de 120 x. Les dimensions de l'inclusion sont d'environ 500 µm de large et entre 550 à 600 µm de long.

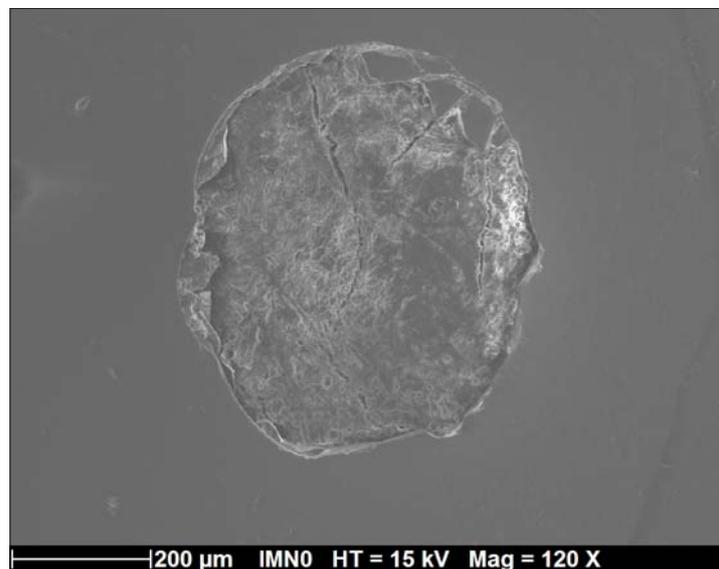
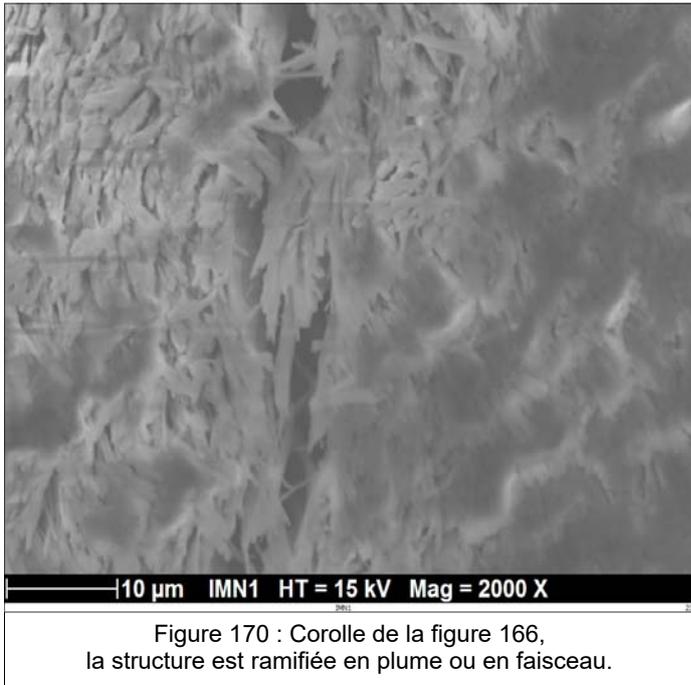


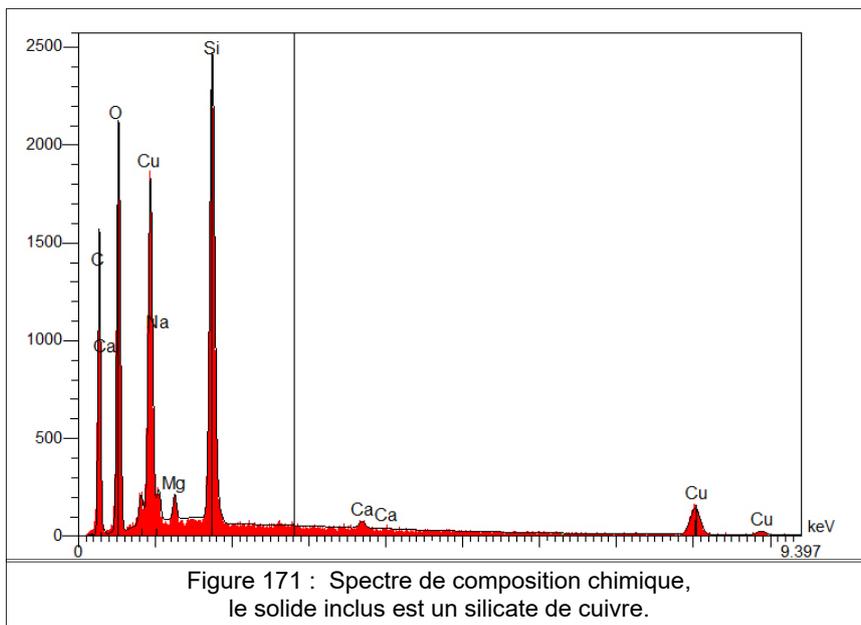
Figure 169 : Les dimensions de l'inclusion sont d'environ 500 µm de large et entre 550 à 600 µm de long.



À la binoculaire, nous avons observé des fibres partant d'un point central (agrégat fibro-radié). Cette photo (figure 170) prise au MEB en électron secondaire avec un grossissement de 2000 x permet de révéler une structure différente. L'agencement de ces fibres est dense. Elles sont ramifiées et montrent un aspect plutôt en plume ou en faisceau.

Le spectre de composition chimique divulgue tous les pics du cuivre (figure 171). Ce solide inclus est un silicate de cuivre, mais lequel, gilalite ou apachite?

La gilalite contient environ 35,93% de cuivre contre 37,75% pour l'apachite. La chimie de ces deux silicates de cuivre est quasiment semblable (*Source: webmineral.com*).



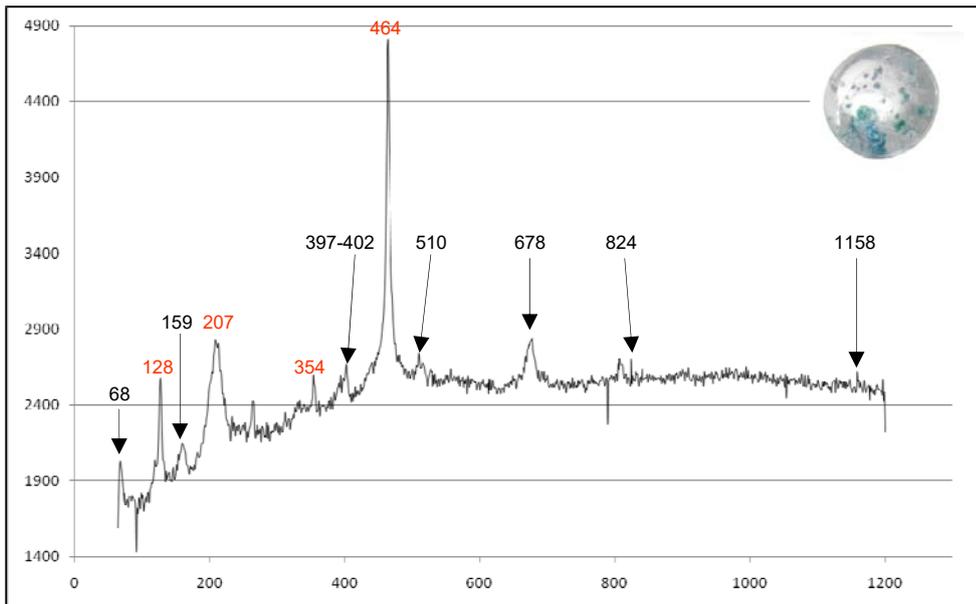
Éléments	% poids	% atomique
O	1,83	60,59
Na	1,10	2,45
Mg	0,55	1,16
Si	12,96	23,75
Ca	0,36	0,46
Cu	14,32	11,60
Total	48,11	100,01

Tableau 16 : Éléments en poids et % atomique.

Les résultats obtenus lors de l'analyse chimique ne sont pas déterminants, nous n'avons pas les pourcentages d'oxydes (tableau 16). CaO et MgO sont présents dans les deux minéraux, mais avec des différences de pourcentages de 2% et 0.60%. Le manganèse est présent en impureté dans la gilalite et pour l'apachite, c'est le fer (Source : *Mineral Data Publishing, 2001*). Notre échantillon ne comporte ni l'un ni l'autre.

Tests Raman

Après plusieurs tentatives non concluantes au Raman LabRam300, nous avons enfin obtenu les pics suivants (figure 172) à : 68, 159, 510 et 824 cm^{-1} , un plus faible à 1158 cm^{-1} , un pic à 402 avec épaulement à 397 cm^{-1} et un pic significatif à 678 cm^{-1} comportant plusieurs épaulements à 672, 668 et 664 cm^{-1} .



Pics principaux

68
159
402
510
678
824
1158

Pics du quartz

128
207
354
464

Figure 172 : Pics à 68, 159, 510 et 824 cm^{-1} , un pic à 402 avec épaulement à 397 cm^{-1} et un pic significatif à 678 cm^{-1} .

Le minéral gilalite n'a pas été référencé dans la base de données RRUFF, il n'y a donc pas de spectre de référence. Les silicates de cuivre ont un profil de spectre fort similaire. Les pics se situent en général entre 100 et 700 cm^{-1} avec toutefois une différence, la vibration fondamentale. Pour l'apachite et l'ajoïte, elle se situe à environ 680 cm^{-1} . Pour la planchéite, la fondamentale se situe à 650 cm^{-1} et pour la shattuckite à 520 cm^{-1} .

Le spectre RRUFF de l'apachite montre une multitude de massifs hauts et larges. Les plus significatifs sont à 203, 380, 691 et 1158 cm^{-1} . Ces vibrations présentent une cohérence discutable avec celles que nous avons obtenues (figure 172), mais elles ne suffisent pas pour affirmer qu'il s'agit bien de l'apachite.

Discussion :

À ce stade des investigations, le seul élément en faveur de l'apachite serait l'absence de pléochroïsme (Cesbron & Williams, 1980) de notre échantillon et de trois autres testés pour confirmation.

La gilalite et l'apachite sont apparemment souvent associées ensemble. Deux études ont été réalisées en spectroscopies Raman et infrarouge pour caractériser la structure moléculaire de ces deux silicates de cuivre, mais les spectres n'ont pas été divulgués. Selon toute probabilité, la spectrométrie Raman aurait montré clairement l'absence de motifs OH dans la structure de la gilalite (Lopes et al., 2014) et la présence de ce groupement OH dans la structure de l'apachite (Frost & Xi, 2012).

N'ayant pas recherché la bande à 3450 cm^{-1} attribuée à une vibration du groupement OH, nous ne pouvons pas conclure.

Aucune conclusion possible.

AB12

Description

Cet échantillon a été acheté au salon de Tucson, il provient de Madagascar. Il a été vendu comme un quartz à inclusion de céladonite, mais il pourrait s'agir de fuchsite.



Figure 173 : échantillon AB12

Polariscope	rétablit la lumière tous les 90° sauf dans l'axe optique		
Indice de réfraction	No	Ne	Biréfringence
	1.543	1.552	0.009
Luminescence	U.V.C	U.V.L	
	inerte	inerte	
Densité	2.623		
Filtre de Chelsea	gris		
Résultat	quartz		

Tableau 17 : Test de gemmologie classique de l'échantillon AB12

La muscovite et la céladonite sont deux silicates qui appartiennent au groupe des micas, ils forment une série. La grande majorité des micas contiennent de l'aluminium et du potassium. La céladonite, la muscovite, le phlogopite et l'eastonite contiennent environ le même % de potassium de 9,1 à 9,8% (webmineral.com). Il existe plusieurs variétés de muscovite et de céladonite. La fuchsite et la chromecéladonite sont les espèces vertes riches en chrome. Pour ces deux espèces, le chrome se substitue à l'aluminium dans le réseau (Tischendorf et al., 2007).

En général, les différents types de céladonite sont exempts d'aluminium, sauf la variété aluminocéladonite qui en contient environ 6,7% (webmineral.com).

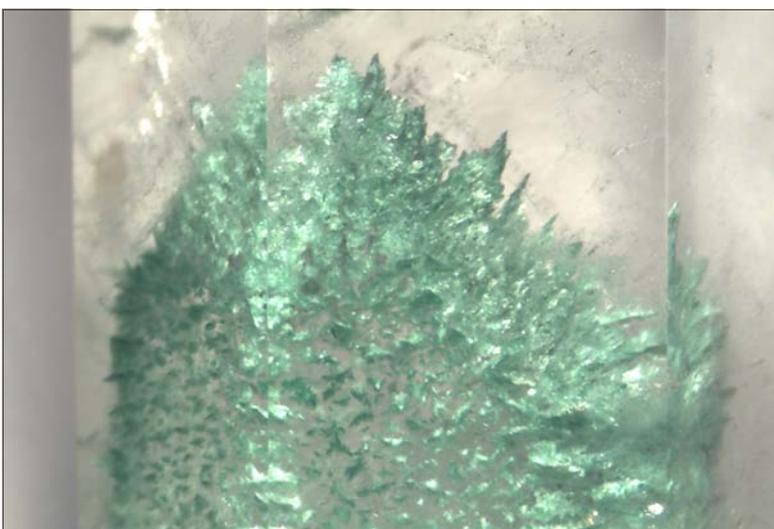


Figure 174 : Grossissement 40 x.
Fantômes de croissance vert vif à l'éclat pailleté disposés à la base du prisme.

Observation des inclusions au microscope

Cet échantillon présente des fantômes de croissance vert pâle vif disposés aux extrémités du prisme. Ils ont un éclat pailleté (figure 174).

La coupe transversale (figure 175) atteste que ces inclusions suivent la même orientation cristallographique que le minéral hôte.



Figure 175 : Coupe transversale.

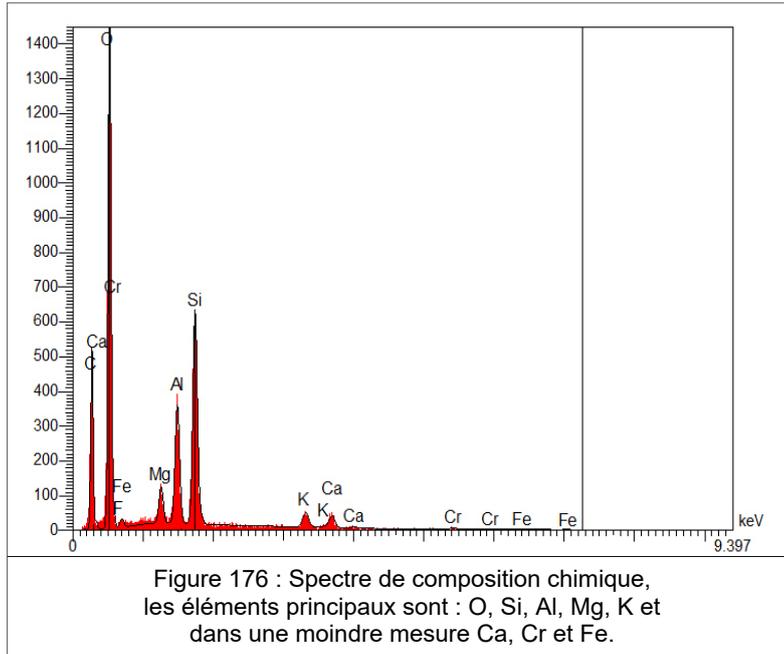
Tests Raman

Après plusieurs tentatives infructueuses au Raman LabRam300 et T64000, nous constatons que ces inclusions ne ramanisent pas.

Observations et analyses au MEB

Les résultats quantitatifs (tableau 18) montrent que cette inclusion contient du silicium, de l'aluminium, du magnésium et du potassium en petit pourcentage. Le chrome et le fer sont présents en impuretés. Le taux d'oxygène semble être anormalement élevé.

Cependant, nous pouvons au vu de ces résultats semi quantitatifs nous orienter vers un phyllosilicate du groupe des micas.



Éléments	% poids	% atomique
O	17,21	83,10
Mg	0,54	1,70
Al	1,58	4,52
Si	3,22	8,85
K	0,43	0,85
Ca	0,38	0,73
Cr	0,10	0,15
Fe	0,07	0,10
Total	23,53%	100,00%

Tableau 18 : Éléments en poids et % atomique.

Le pourcentage de magnésium et le faible taux de chrome excluent d'emblée la muscovite chromifère (fuchsite), mais deux espèces de mica pourraient correspondre à ces résultats, l'eastonite et l'aluminoceladonite.

L'eastonite contient un fort pourcentage d'aluminium et de magnésium contrairement à l'aluminoceladonite qui se rapproche plus ou moins de nos résultats. Ce minéral présente également, une morphologie tout à fait semblable à notre échantillon (figure 177).

Conclusion : quartz à inclusion d'aluminoceladonite.



Figure 177 : Aluminoceladonite
Source : www.mindat.org

AB13

Description

Ce quartz à inclusions de lazulite a été acheté dans le cadre du DUG, il provient de Madagascar.

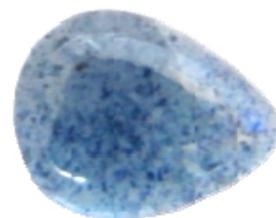


Figure 178 : échantillon AB13 à inclusions dites de "lazulite"

Polariscope	rétablit la lumière tous les 90° sauf dans l'axe optique		
Indice de réfraction	No	Ne	Biréfringence
	1.541	1.550	0.009
Luminescence	U.V.C	U.V.L	
	inerte	inerte	
Densité	2.669		
Pléochroïsme	fort : incolore, bleu, bleu foncé		
Résultat	quartz		

Tableau 19 : Test de gemmologie classique de l'échantillon AB13

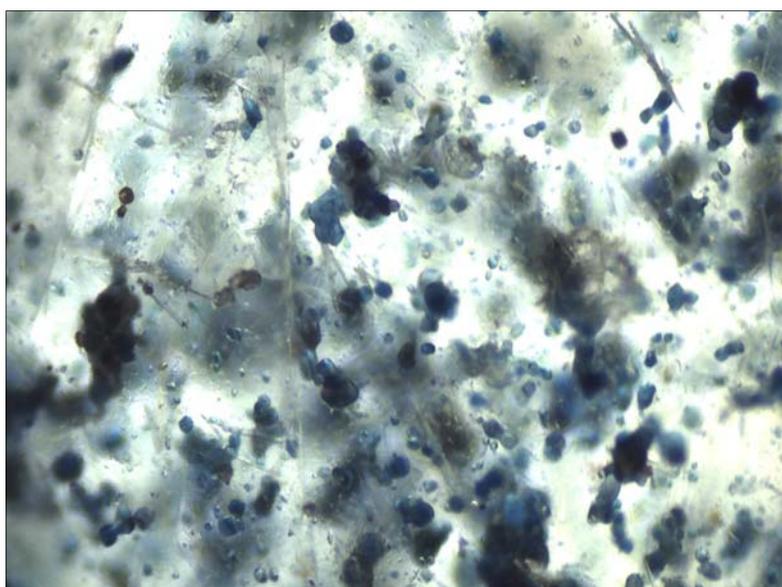


Figure 179 : Grossissement 40 x.
Concentration importante de cristaux de taille,
de forme et de couleur différentes.

La lazulite est un phosphate d'aluminium et de magnésium contenant du fer, elle cristallise dans le système monoclinique (mindat.org). Ce minéral donne son nom à un groupe et fait partie d'une série, la lazulite étant le pôle riche en magnésium et la scorzalite l'autre pôle riche en fer. Sa couleur est généralement d'un bleu vif profond, les cristaux de lazulite présentent un fort pléochroïsme. Le quartz à lazulite de Madagascar a été étudié par les Professeurs Emmanuel Fritsch et Bernard Lasnier par analyses SEM-EDXRF et Raman. La profusion de cristaux de lazulite induit manifestement la couleur bleue du quartz, mais d'autres inclusions sont présentes tel que l'ilménite, le rutile, l'apatite, le zircon, la célestite, l'anhydrite, l'hématite, le mica et la svanbergite (Fritsch & Lasnier, 1997).

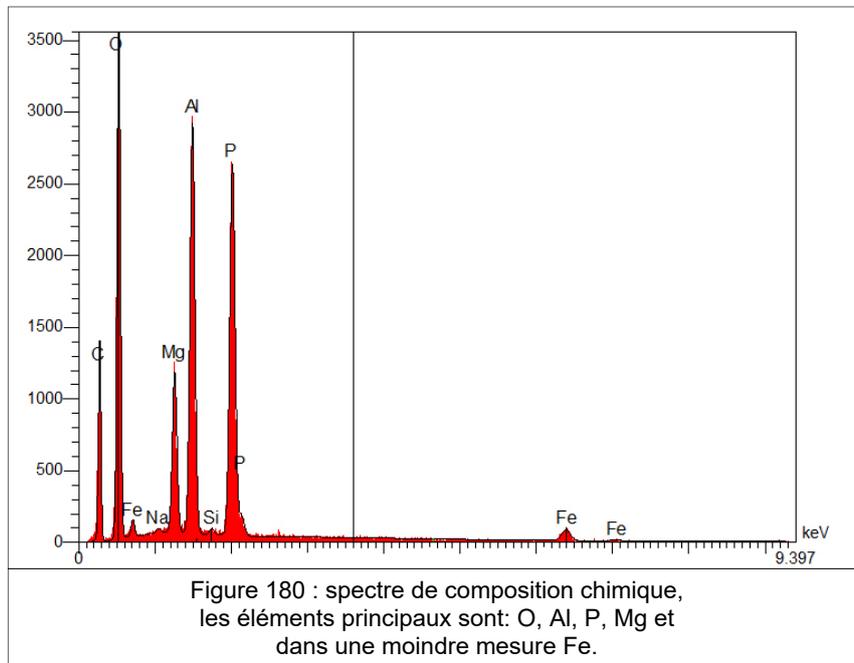
Observation des inclusions au microscope

Cet échantillon comporte une concentration importante de cristaux de taille, de forme et de couleur différentes (figure 179). Certains cristaux bleu très foncé présentent un fort pléochroïsme, incolore, bleu pâle à bleu foncé. L'arrangement de ces cristaux au sein du minéral hôte est aléatoire. Certains solides présents dans cet échantillon sont caractérisés par leur croissance dans les trois directions de l'espace, mais l'érosion et/ou la dissolution des angles et des arêtes ne permettent pas de définir le système cristallin. Pour les autres solides, la grande majorité présente un habitus en grains irréguliers.

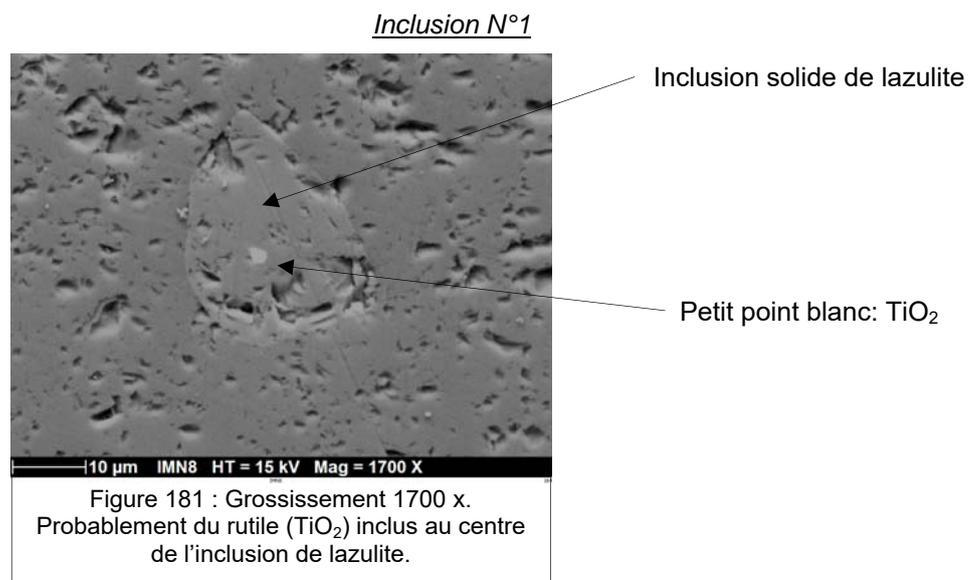
Analyses au MEB de plusieurs cristaux inclus

Inclusion N°1

La première étude concerne une inclusion bleu foncé affleurant en surface. Les éléments chimiques présents dans ce solide sont du phosphore, de l'aluminium, du magnésium et en moindre mesure du fer (figure 180). Nous sommes en présence d'une inclusion de lazulite.



L'image (figure 181) a été obtenue en mode électron secondaire SE avec un grossissement de 1700 x. L'analyse de cette inclusion a révélé la présence de dioxyde de titane au centre du cristal de lazulite, il pourrait s'agir de rutile.

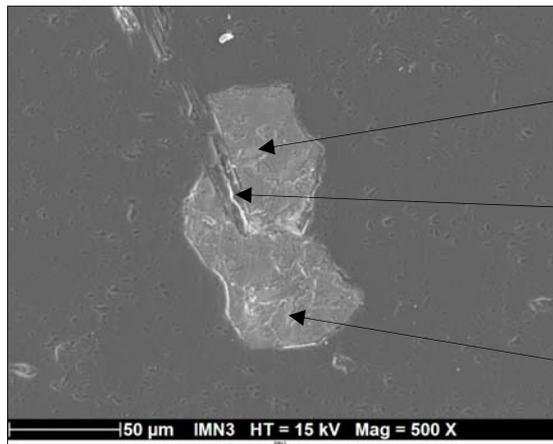


Est-ce que cet échantillon comporte uniquement des inclusions de lazulite?

D'autres cristaux inclus proche de la surface vont également être analysés. Les photos des figures 182, 183 et 184 ont été prises en électron secondaire SE.

Inclusion N°2

Cette inclusion cristalline (figure 182) est composée de sulfate de strontium, il s'agit probablement d'un cristal de célestite, minéral relativement commun à Madagascar. Il est lui-même traversé en haut à gauche par une fibre composée de silicate d'alumine, peut-être des fibres de sillimanite ou de disthène, son polymorphe.



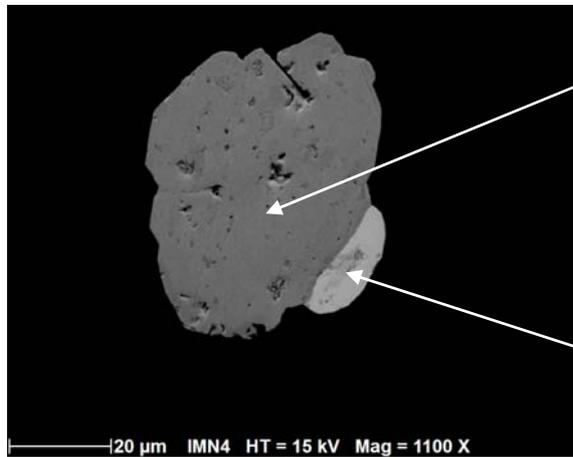
Célestite
Fibre composée de silicate d'alumine
Célestite

Figure 182 : Grossissement 500 x.
Inclusion de célestite traversée par des fibres de sillimanite ou de disthène.

Inclusion N°3

Ce solide inclus (figure 183) est hétérogène, on différencie deux parties bien distinctes. Une zone opaque en gris foncé et une zone beaucoup plus claire en bas à droite.

L'analyse EDS confirme que nous sommes en présence d'un silicate de zirconium (zircon) pour la partie foncée. La zone claire est composée de phosphate d'yttrium avec des % non négligeables de terres rares (Gd, Dy, Yb, Pr), il pourrait s'agir du minéral xénotime (Y).



Inclusion solide de zircon
Inclusion probable de xénotime (Y)

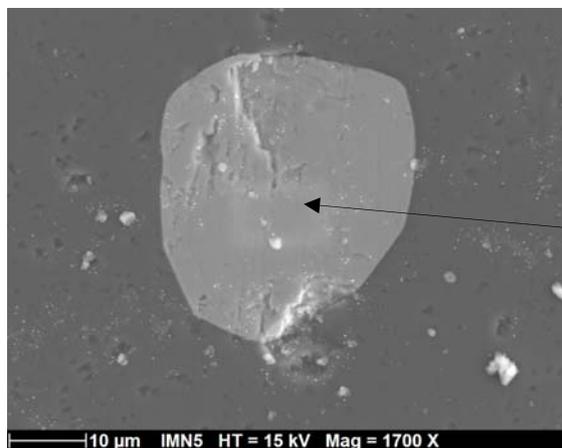
Figure 183 : Grossissement 1100 x.
Le solide inclus est hétérogène.
La partie sombre est une inclusion de zircon, la partie claire est probablement du xénotime (Y).

Inclusion N°4

L'analyse EDS effectuée sur cette inclusion (figure 184) indique qu'il s'agit à nouveau d'un phosphate.

Sa composition chimique présente de nombreuses terres rares dont les principales sont : le cérium (Ce), le lanthane (La), et le néodyme (Nd) ainsi que quelques pourcentages de gadolinium (Gd) et de dysprosium (Dy).

Au vu des résultats, nous concluons au minéral monazite (Ce, La, Y, Th), phosphate monoclinique hautement radioactif.



Inclusion probable de monazite (Ce, La, Y, Th)

Figure 184 : Grossissement 1700 x.
La composition chimique présente de nombreuses terres rares. Ce, La, Nd, Gd, Dy.

Tests Raman

L'échantillon a été testé au Raman HORIBA T64000, trois spectres ont été obtenus de trois inclusions différentes. À noter que certaines inclusions de couleur bleu foncé ne donnent aucun signal.

Le premier spectre (figure 185) a été pratiqué sur une inclusion presque incolore. Il a été obtenu avec un temps d'acquisition de 2 fois 30s pour améliorer le rapport signal sur bruit.

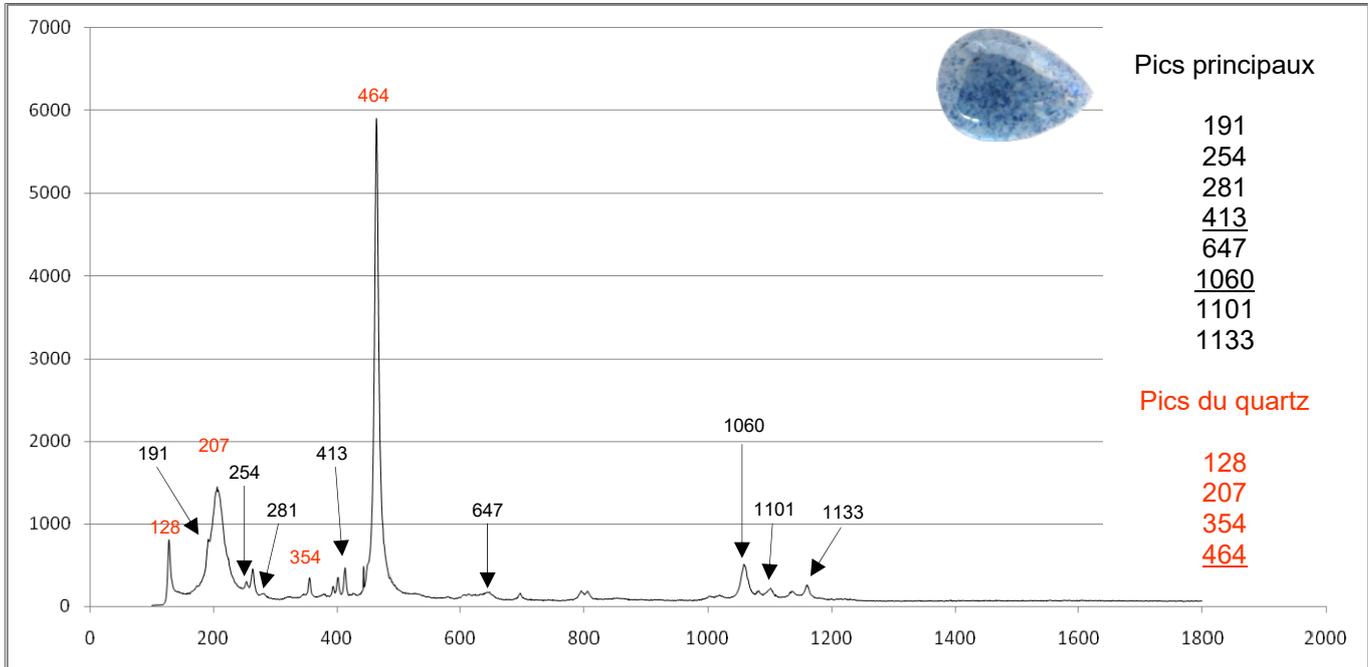


Figure 185 : Spectre présentant de nombreux pics à 191, 254, 281, 413, 647, 1060, 1101 et 1133 cm^{-1} .

Ce spectre Raman (figure 185) présente de nombreux pics, les pics principaux sont représentés ci-dessus 413 et 1060 cm^{-1} , on peut noter cinq à six bandes entre 605 et 647 cm^{-1} , les autres pics sont à 191, 254, 281, 1101 et 1133 cm^{-1} .

J'ai remarqué que la plupart des phosphates présentent souvent de nombreux pics après 900 cm^{-1} , c'est le cas de cet échantillon.

Le spectre Raman du minéral lazulite issu de la base de données RRUFF (figure 186) donne des pics de vibrations à 101 191 224 254 281 321 378 414 478 612 646 1002 1059 1101 1137 cm^{-1} .

Ces deux spectres sont similaires, les signaux donnés par les différents pics correspondent bien à la lazulite.

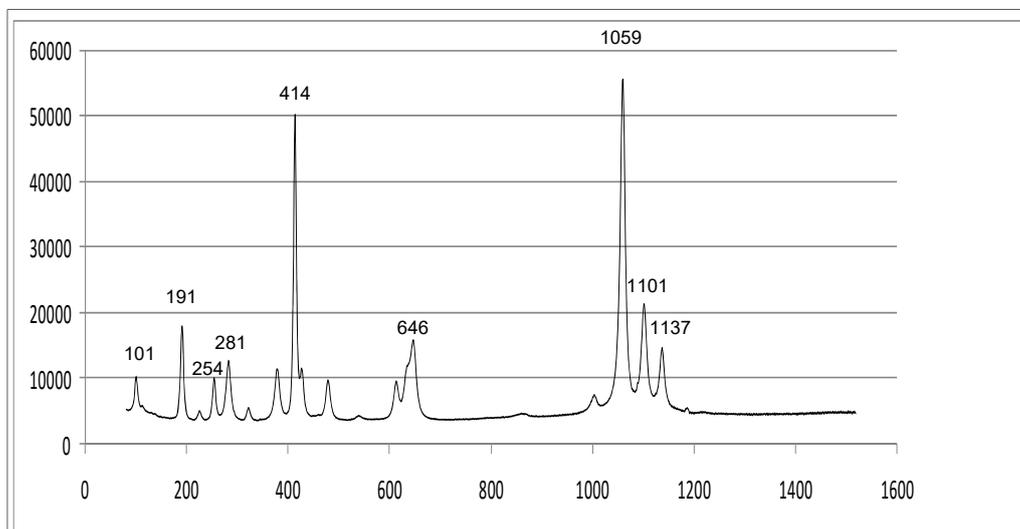


Figure 186 : Spectre de la lazulite R050110.3
Source : www.ruff.info

Le deuxième spectre obtenu (figure 187) concerne une inclusion légèrement grisâtre. Il donne de nombreux pics à 226, 246, 290, 331, 337, 399, 578, 655, 788, 1012 et 1207 cm^{-1} , un épaulement à 788, un doublet à 1056-1064 cm^{-1} et des pics importants à 998, 1117, 1155, 1243 et 1302 cm^{-1} .

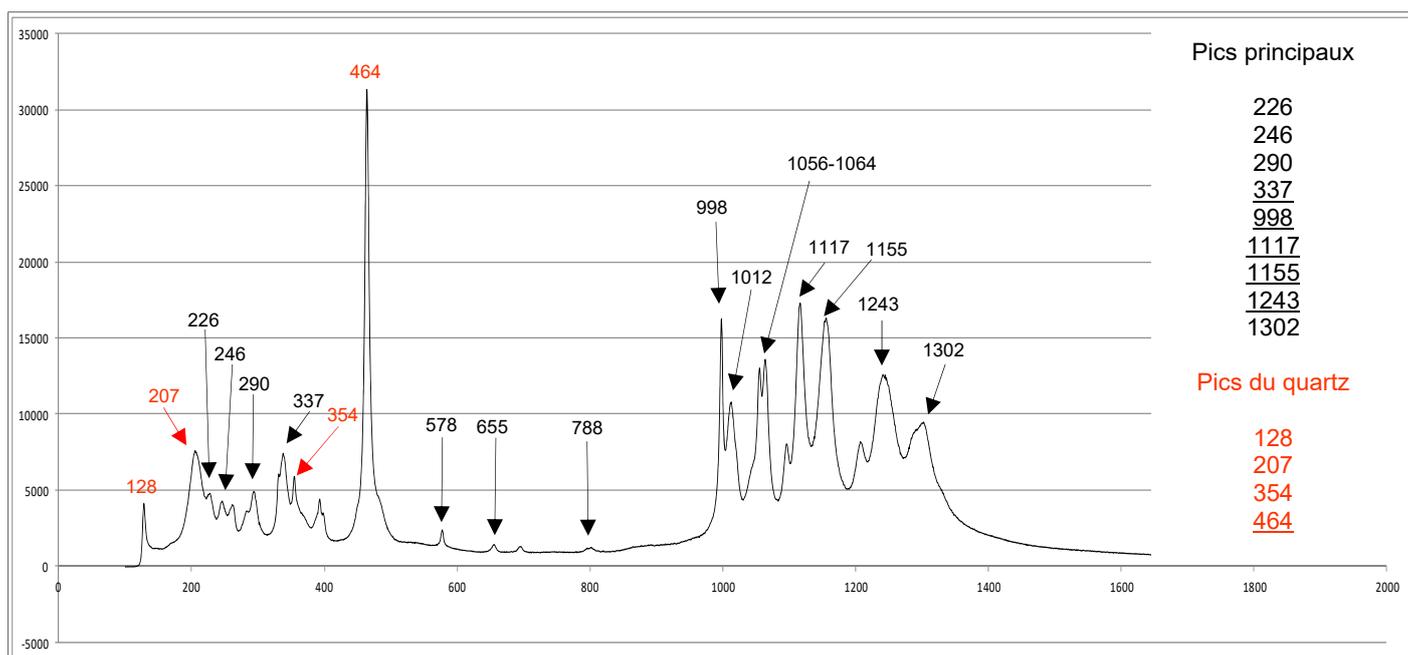


Figure 187 : Nombreux pics à 226, 246, 290, 331, 337, 399, 578, 655, 788, 1012 et 1207 cm^{-1} , un épaulement à 788, un doublet à 1056-1064 cm^{-1} , des pics hauts à 998, 1117, 1155, 1243 et 1302 cm^{-1} .

Ce spectre correspond à celui de la base de données RRUFF (figure 188) et confirme également l'analyse chimique EDS, ce solide inclus dans le quartz à lazulite est du xénotime (Y).

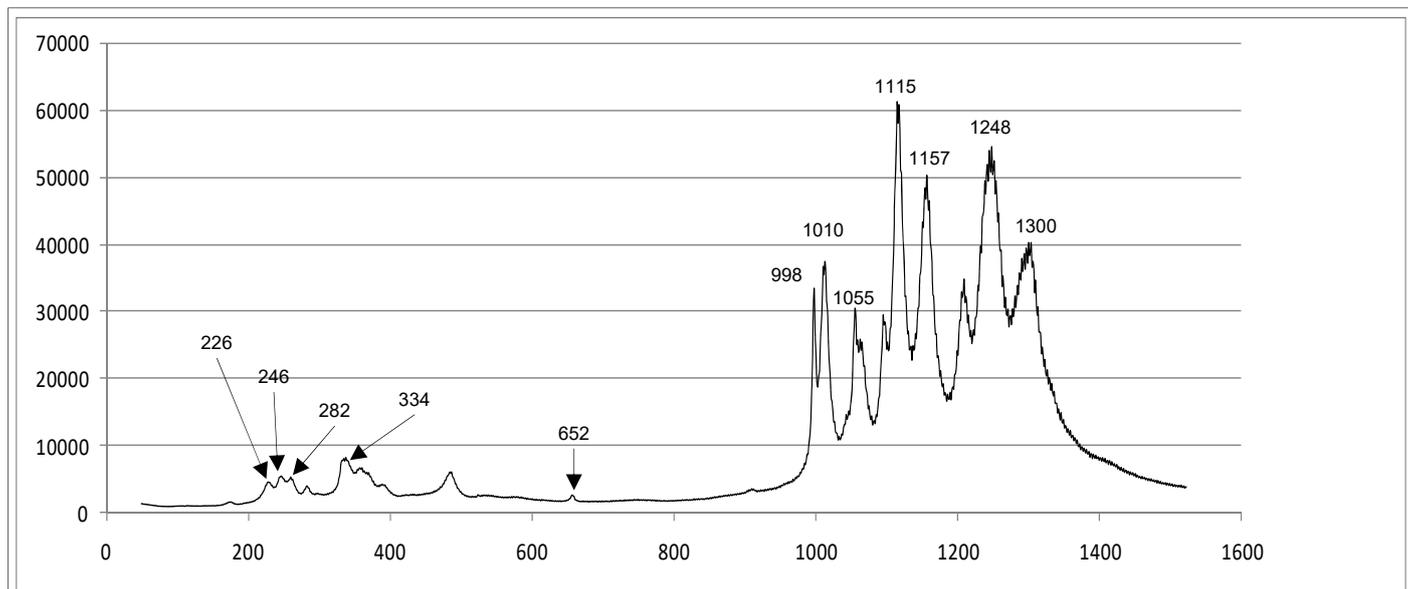


Figure 188 : Spectre du xénotime (Y) R050178
Source : www.ruff.info

Discussion :

Les inclusions bleues ne donnent pas le signal attendu, nous avons obtenu des pics Raman de lazulite uniquement sur de toutes petites inclusions bleu pâle à presque incolore. Un autre échantillon a été testé, nous avons constaté que certaines inclusions bleu foncé donnent un spectre du quartz, mais dans une autre orientation, il aurait été intéressant de cumuler les spectres, mais malheureusement le Raman est tombé en panne à ce moment-là.

Trois autres inclusions différentes de celles évoquées page 60 ont été identifiées. Deux phosphates peu courants, le xénotime (Y) et la monazite ainsi qu'un silicate d'alumine de type sillimanite ou disthène.

Conclusion : quartz à inclusions de lazulite.

AB14

Description

Ce quartz a été acheté à Thierry Pradat, il a été vendu comme étant un quartz à inclusions de lépidocrocite, sa provenance géographique est inconnue.

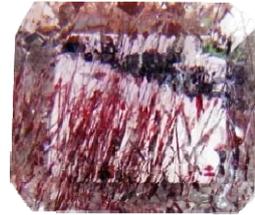


Figure 189 : échantillon AB14 à inclusions dites de "lépidocrocite"

Polariscope	rétablit la lumière tous les 90° sauf dans l'axe optique		
Indice de réfraction	No	Ne	Biréfringence
	1.542	1.551	0.009
Luminescence	U.V.C	U.V.L	
	inerte	inerte	
Densité	2.645		
Résultat	quartz		

Tableau 20 : Test de gemmologie classique de l'échantillon AB14

La lépidocrocite est un minéral appartenant à la classe chimique des oxydes et hydroxydes. Elle fait partie du groupe de la boémite et cristallise dans le système orthorhombique. C'est un polymorphe de la goethite (mindat.org). Elle se forme dans les sols riches en fer par altération d'autres minéraux.

La lépidocrocite se présente sous la forme de cristaux brun-rouge (figure 190), mais à l'état pulvérulent elle est jaune-orangé couleur safran. Les aiguilles de lépidocrocite seraient apparemment très similaires à celles de l'hématite de par leur forme (aiguilles ou plaquettes) et leur couleur (rouge à brun violacé noirâtre).



Figure 190 : Lépidocrocite. Photo de S. Wolfsried
Source : www.mindat.org

À ce jour aucune analyse n'est jamais venue étayer une possible présence de lépidocrocite en inclusion dans le quartz (Hyrsl & Niedermayr, 2003).

Observation des inclusions au microscope

La photo (figure 191) de cet échantillon a été prise en lumière transmise avec un grossissement de 20 x. Les inclusions sont composées d'aiguilles longues, tortueuses, rouge vif en forme de flèches coplanaires (figure 192) dont l'extrémité se termine par de petites plaquettes à l'habitus lamellaire très minces et de couleur noire (figure 191).



Figure 191 : Les aiguilles rouges se terminent par de petites plaquettes à l'habitus lamellaire très minces et de couleur noire .

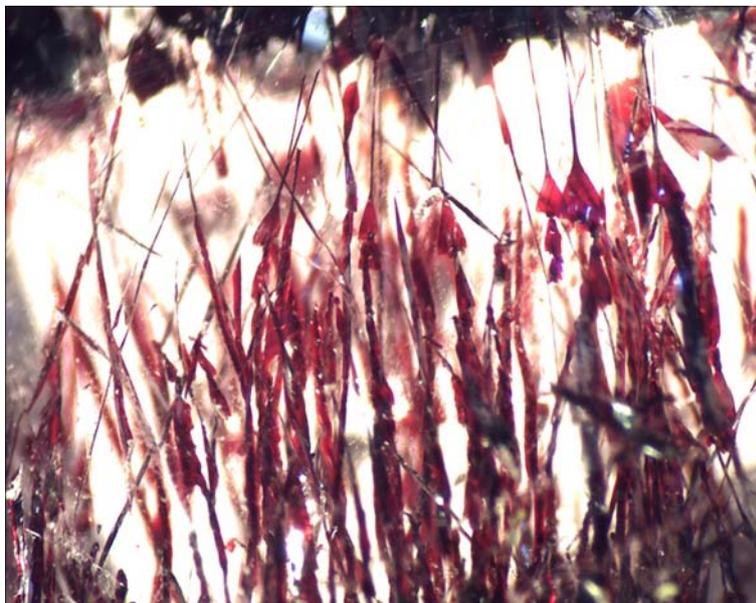


Figure 192 : Grossissement 40 x
Les inclusions sont composées d'aiguilles longues, tortueuses, rouge vif en forme de flèches coplanaires.

Observation et analyses au MEB

L'analyse chimique (EDS) révèle qu'il s'agit bien d'un oxyde de fer (figure 193), avec un pourcentage atomique de 70,78 % pour l'oxygène et de 29,22% pour le fer.

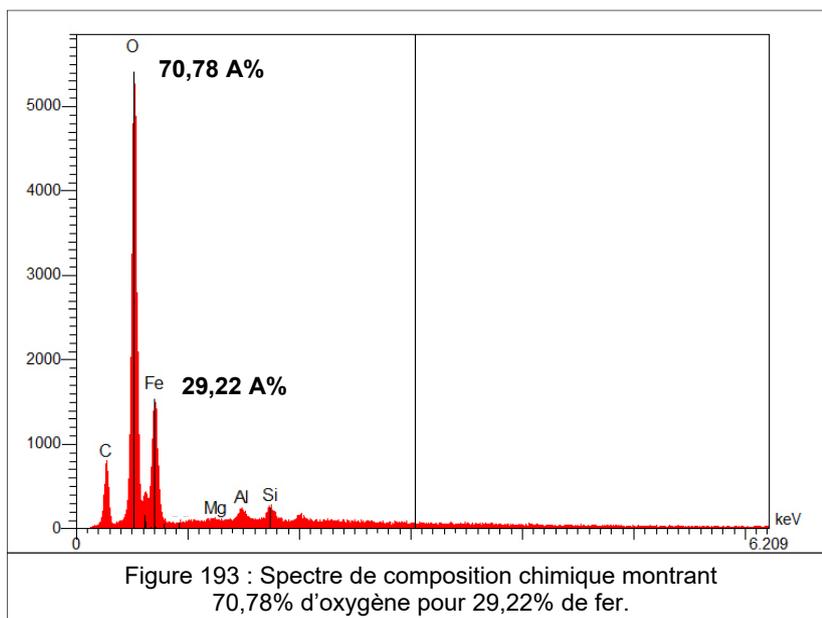


Figure 193 : Spectre de composition chimique montrant 70,78% d'oxygène pour 29,22% de fer.

Dans la lépidocrocite Fe_2O_3 représente 89,90 % et H_2O environ 10,77% Mineral Data Publishing, version 1, 2001-2005) avec apparemment un seul élément trace, Mn (mindat.org). Dans l'hématite Fe_2O_3 représente 98,14% et Mn_2O_3 environ 0,54% (Mineral Data Publishing, version 1, 2001-2005). Cet oxyde de fer peut contenir les éléments traces suivant: Ti, Al, Mn et H_2O (mindat.org).

Le spectre ci-dessus (figure 193) révèle un pic de l'aluminium, un des éléments traces de l'hématite mais cette information n'est pas suffisante pour conclure.

Tests Raman

Deux séries de tests ont été pratiquées sur cette inclusion, l'une sur une plaquette noire, opaque et dense et l'autre sur une plaquette rouge, fine et translucide. Le premier spectre obtenu (figure 194) est celui de la partie noire de l'inclusion. Elle a été analysée au Raman dispersif HORIBA T64000 avec un temps d'acquisition de 2 fois 60s et une configuration T triple.

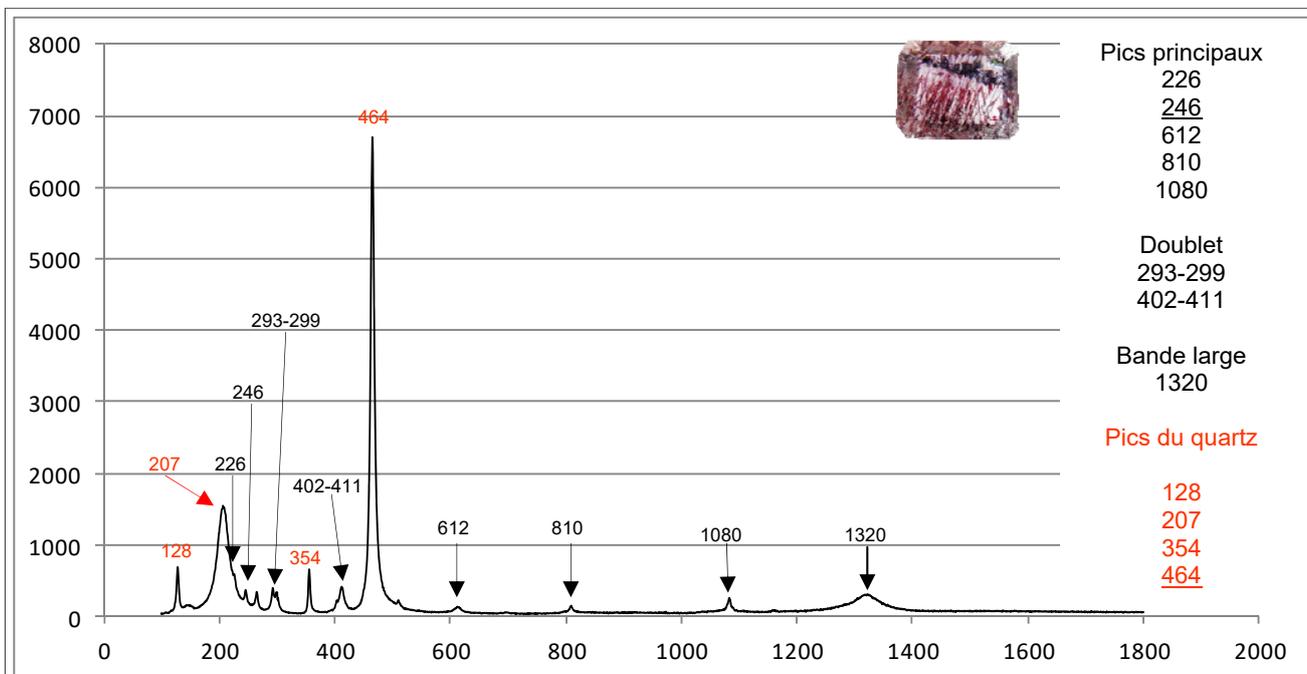


Figure 194 : Un pic significatif à 246 cm^{-1} , un doublet à 293-299 ainsi qu'un autre à 402-411 cm^{-1} . D'autres pics à 612, 810 et 1080 cm^{-1} ainsi qu'une bande large à 1320 cm^{-1} .

Le spectre (figure 194) montre un pic significatif à 246 cm^{-1} , un doublet à 293-299 ainsi qu'un autre à 402-411 cm^{-1} . D'autres pics apparaissent également à 612, 810, 1080 cm^{-1} ainsi qu'une bande large à 1320 cm^{-1} . L'inclusion rouge a été testée en configuration T simple avec 100 μm de fente à l'entrée du spectro plus filtre pour un meilleur signal, mais il est tout de même faible. Le résultat obtenu est identique à celui de la partie noire. Les deux spectres obtenus sont conformes à celui de la base de données RRUFF (figure 195) que ce soit pour la partie rouge ou pour la partie noire. Lors des tests Raman, nous n'avons pas recherché le signal de l'eau à 3200 cm^{-1} ce qui aurait pu d'emblée éliminer la lépidocrocite en cas d'absence.

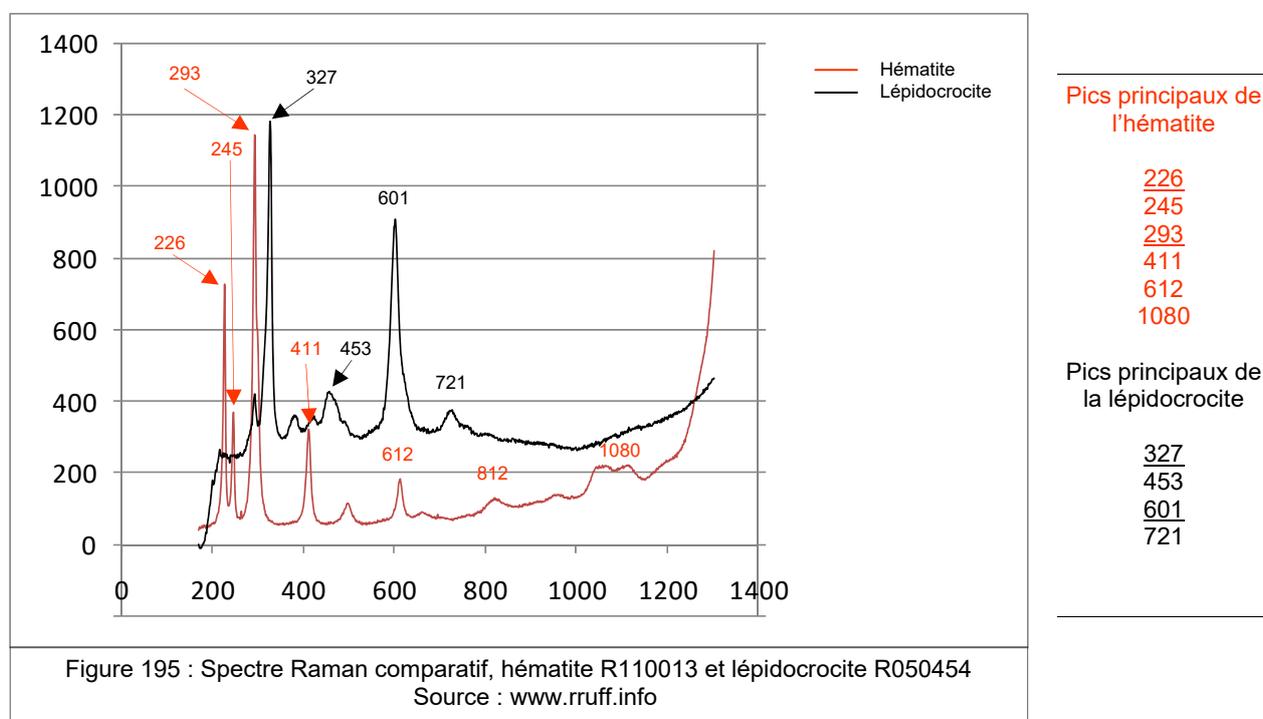


Figure 195 : Spectre Raman comparatif, hématite R110013 et lépidocrocite R050454
Source : www.ruff.info

Le spectre Raman de l'hématite a été comparé à celui de la lépidocrocite (figure 195). L'hématite présente une fondamentale à 293 cm^{-1} , un grand pic à 226 cm^{-1} , trois plus petits à 245, 411 et 612 cm^{-1} ainsi qu'une bande large à 1080 cm^{-1} . La lépidocrocite présente deux pics à 453 et 601 cm^{-1} et une fondamentale à 327 cm^{-1} . Les deux spectres sont dissemblables, nous pouvons conclure:

Quartz à inclusion d'hématite.

AB15

Description

Ce quartz à inclusions d'hématite a été acheté dans le cadre du DUG, il provient du Brésil.



Figure 196 : échantillon AB15 à inclusions dites "d'hématite"

Polariscope	rétablit la lumière tous les 90° sauf dans l'axe optique		
Indice de réfraction	No	Ne	Biréfringence
	1.550	1.559	0.009
Luminescence	U.V.C	U.V.L	
	inerte	inerte	
Densité	2.624		
Magnétisme	non		
Résultat	quartz		

Tableau 21 : Test de gemmologie classique de l'échantillon AB15

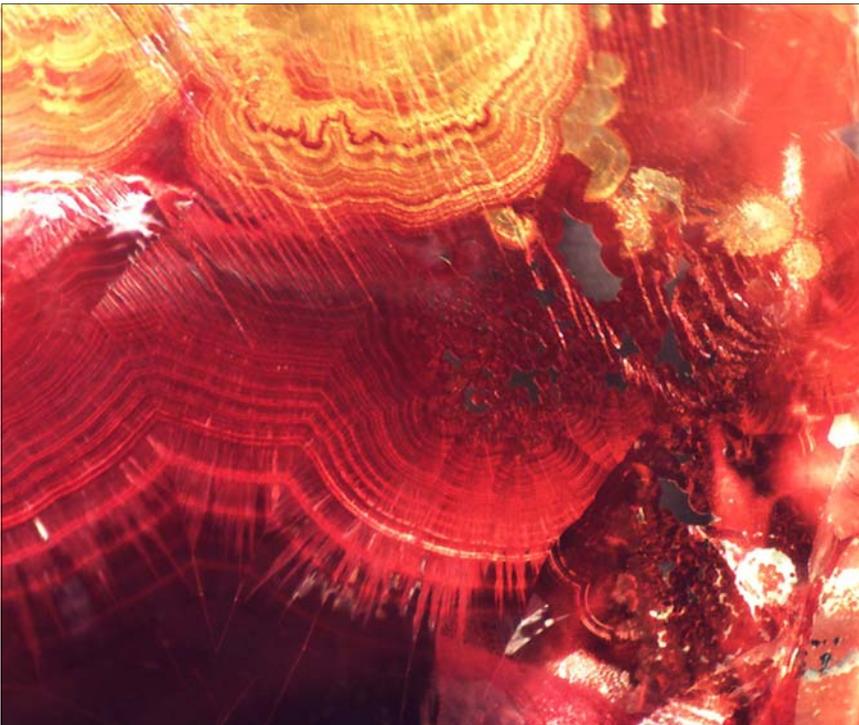


Figure 197 : Grossissement 25 x.
Inclusion épigénétique se présentant en portions de disques fibroradiés.
Le faciès est rubané, l'inclusion est principalement rouge.

L'hématite Fe_2O_3 est l'oxyde de fer le plus stable, sa structure est isotype du corindon (Pauling & Hendricks, 1925).

L'hématite est un minéral ferreux très répandu et existe dans des contextes géologiques très variés. Ses cristaux sont trapus et souvent aplatis ou lamellaires, parfois réunis en agrégats en forme de rose ou en masses compactes à l'aspect botryoïdal (Cipriani, 1996).

Cet oxyde de fer peut être maclé, mais ne possède pas de clivage. Les couleurs vont de noir, gris acier, noir bleuté à rouge brun (mindat.org). En plaque très mince (figure 197), l'hématite est rouge et translucide.

Observation des inclusions au microscope

Cet échantillon (figure 197) comporte des fractures internes. L'inclusion se présente en portions de disques fibroradiés qui semblent tapisser une grande fissure de ce quartz.

Cette inclusion épigénétique dont le faciès est rubané est principalement rouge, certains secteurs sont jaunes (figure 198).

La photo ci-dessous (figure 198) a été prise en lumière transmise avec un grossissement de 40 x, on distingue nettement les différents secteurs de couleur. Cet agrandissement nous permet également d'observer des dendrites qui pourraient être de l'hématite selon Gübelin & Koivula (2005), page 543.

Les portions de disques fibroradiés (figure 199) ont été observées ensuite avec un polariscopie de poche posé directement sur la platine du microscope, dans la partie rouge, certaines zones rétablissent la lumière tous les 90°.

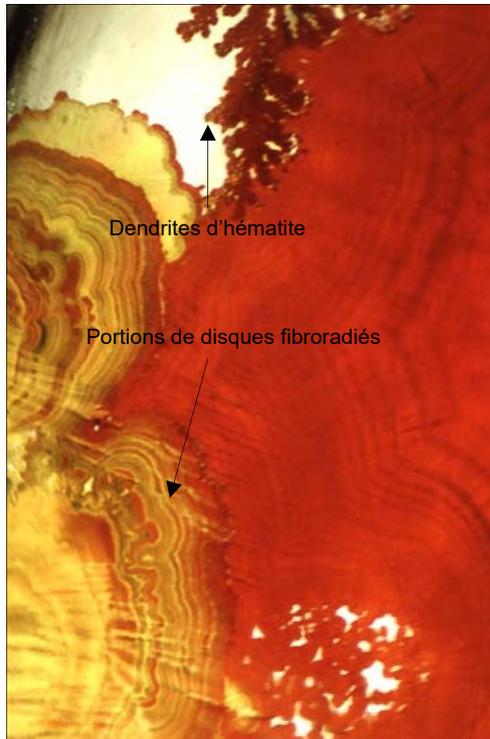


Figure 198 : Grossissement 40 x. Portions de disques fibroradiés et dendrites d'hématite.

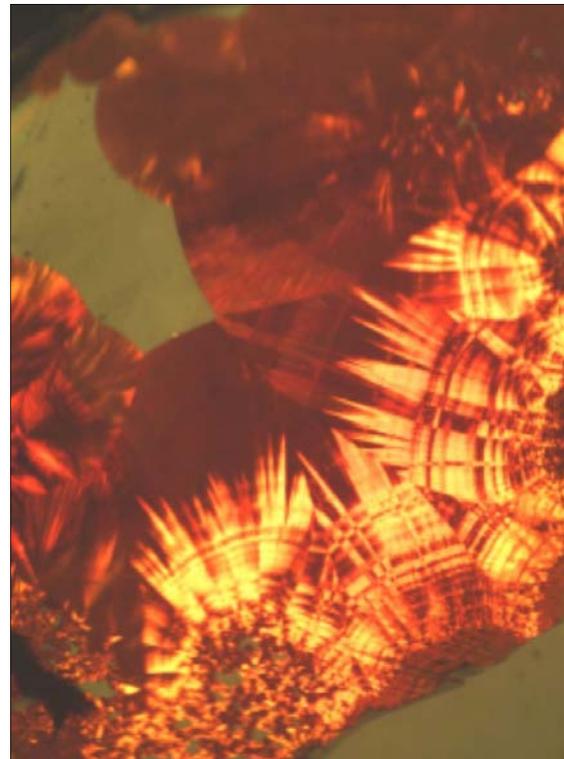


Figure 199 : Grossissement 25 x. Observation des portions de disques fibroradiés entre polariseurs croisés.

Cette photo (figure 200) prise par J. Koivula (2003) montre de très fines plaquettes d'hématite incluses dans le quartz. En lumière polarisée (figure 201), ces disques d'hématite peuvent présenter des croix d'extinction.



Figure 200 : Hématite dans le quartz. Photo de J. Koivula.

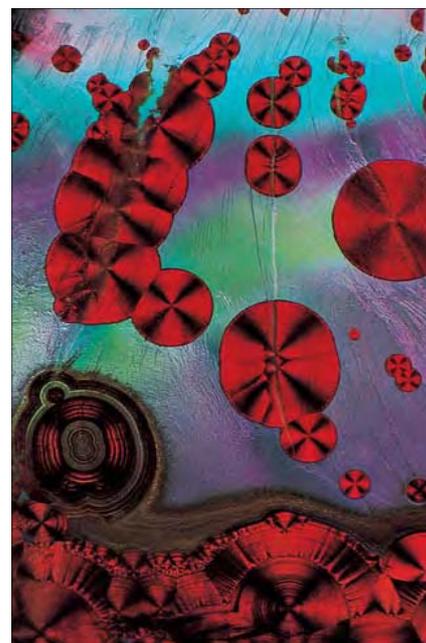
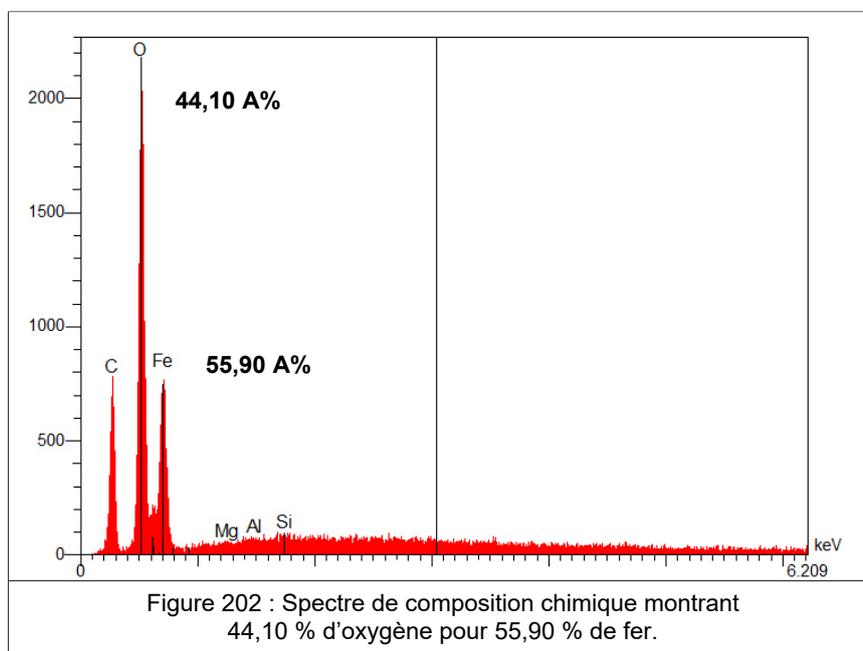


Figure 201 : Croix d'extinction. Photo de J. Koivula.

Observation et analyses au MEB

Le spectre de composition chimique (figure 202) montre qu'il s'agit d'un oxyde fer comportant des éléments traces, Al et Mg. Par rapport au spectre de composition chimique (figure 191) de l'inclusion précédente AB14, on note une différence significative dans les taux d'oxygène 70,78% pour 44,10% et de fer 29,22% pour 55,90%.



Discussion :

Les tests Raman opérés sur cet échantillon se sont révélés infructueux, aucun signal n'a été détecté. Il semblerait que cette inclusion soit de trop faible épaisseur, mais nous savons aussi que les oxydes de fer sont des composés qui ne ramanisent presque pas (Rondeau, 1998). Nous ne pouvons donc pas corroborer la présence d'hématite dans cet échantillon.

L'analyse chimique (EDS) révèle qu'il s'agit d'un oxyde de fer, les secteurs jaunes peuvent nous faire penser à l'oxy-hydroxyde de fer jaune, la goethite. De formule chimique $\text{Fe}_3^+\text{O}(\text{OH})$, la goethite est hydratée, H_2O constitue environ 10,14% de sa composition chimique (webmineral.com/goethite). Lors d'une augmentation de température, elle peut se déshydrater et s'altérer en hématite. Ces deux minéraux relativement proches ont un point commun dans leur structure atomique, la présence d'un ion ferrique Fe^{3+} au centre d'un octaèdre. La goethite est constituée d'un assemblage d'octaèdres dans lesquels un atome de fer Fe^{3+} se trouve au centre de trois ions O^{2-} et de trois OH^- , tandis que pour l'hématite, Fe^{3+} se trouvent au centre de six ions O^{2-} (Cornell et Schwertmann, 2003).

La spectrométrie Raman aurait pu divulguer les absorptions dues aux liaisons OH qui apparaissent entre 3100 et 3650 cm^{-1} pour la goethite, nous permettant ainsi de la différencier de l'hématite.

Conclusion : nous suggérons qu'il s'agit d'un quartz à inclusions d'hématite avec une éventuelle présence de goethite jaune.

La gemmologie classique et les difficultés rencontrées.

L'étude des inclusions au microscope peut nous renseigner sur la morphologie des cristaux inclus, les caractéristiques internes ou de surface (plan de clivage, plan de macle), de définir entre polariseurs croisés le caractère optique de l'inclusion en décelant une anisotropie, d'observer un éventuel pléochroïsme des cristaux inclus de couleur avec le dichroscope. La luminescence d'une inclusion peut nous renseigner également.

- Exemple de l'échantillon AB09: le solide inclus se caractérise par un habitus prismatique, nous n'avons pas assez d'indices pour déterminer sa symétrie. On distingue nettement des plans de clivage, on observe une biréfringence. Mais quel est ce matériau anisotrope? L'inclusion est orange, mais est-ce sa couleur intrinsèque? Malgré ces renseignements, l'identification s'avère difficile, voire impossible sans faire appel à des instruments de laboratoire.

Les instruments de laboratoire confirment nos attentes.

- Le clinocllore AB01 a été confirmé par un spectre Raman révélant les pics attendus pour ce minéral. Les résultats obtenus au Raman dispersif ont corroboré nos conjectures pour l'échantillon AB04 chrysocolle, AB07 covellite et AB12 céladonite.

Les instruments de laboratoire révèlent l'identité de l'inclusion.

- Le solide inclus caractérisé par sa surface lamellaire et son absence d'épaisseur dans l'échantillon AB03 s'est avéré être du mica, plus précisément de la biotite identifiée par l'analyse chimique EDS.

- Le test Raman nous permet d'identifier les aiguilles contenues dans l'échantillon AB08. Il ne s'agit pas de boulangérite ou de cosalite mais d'aiguilles de rutile dont l'arrangement est réticulé.

- Pour l'échantillon AB09, l'analyse chimique EDS s'est avérée primordiale sachant qu'il s'agissait d'un sulfate de calcium, nous avons pu ensuite comparer notre spectre Raman à celui de RRUFF et identifier le gypse.

- La lazulite (AB13) est une inclusion courante dans un quartz de Madagascar, elle a été confirmée à la fois par le Raman et le MEB. Les nombreuses inclusions présentes dans ce quartz sont elles toutes de la même famille minéralogique?

Les instruments de laboratoire ont rendu leurs verdicts. Dans cet échantillon, la lazulite cohabite avec la célestite, le zircon, la monazite et le xénotime. Ces inclusions appartiennent à trois classes chimiques différentes : sulfates, silicates et phosphates.

Le diagnostic est difficile à établir malgré les analyses.

- C'est le cas de l'échantillon AB11. Les différentes analyses n'ont pas confirmé la présence de gilalite. Le spectre Raman divulgue quelques pics du minéral apachite, mais l'incertitude demeure sans spectre de référence du minéral gilalite. Dans la littérature, les analyses chimiques de ces deux minéraux montrent du manganèse en impureté dans la gilalite et du fer dans l'apachite. Notre échantillon ne comporte ni l'un, ni l'autre. Nous n'avons pas recherché la bande à 3450 cm^{-1} attribuée à une vibration du groupement OH. Nous savons que les inclusions de cet échantillon ne présentent pas de pléochroïsme, mais c'est insuffisant pour conclure.

- L'inclusion de l'échantillon AB10 ne ramanise pas, elle ne montre aucun signal. L'identification est impossible.

Pour conclure, je souhaiterais insister sur les différents intérêts de cette étude :

- D'un point de vue économique, les acheteurs et les collectionneurs achètent des quartz à inclusions sur la foi de l'étiquette, et l'étiquette fait malheureusement souvent le prix. Le fait de se tromper dans la détermination de l'inclusion peut tirer les prix abusivement vers le haut.

Prenons le cas du quartz à inclusion de lépidocrocite que l'on rencontre sur le marché des gemmes à des prix prohibitifs, il s'agit certainement de quartz à inclusions d'hématite, une inclusion courante du quartz. Nous avons vu que l'inclusion d'hématite dans le quartz (figure 143, 192 et 197) peut se présenter sous différents faciès. Monsieur Hyrsi souligne justement dans son livre (Hyrsi & Niedermayr, 2003), que la lépidocrocite est une erreur d'identification de l'hématite.

Je souhaiterais également souligner les erreurs d'identification dans la littérature, elles sont souvent basées sur l'analyse de critères visuels (la morphologie, la couleur, le pléochroïsme, l'éclat...), mais nous avons démontré que cela ne suffit pas.

L'échantillon AB02, l'inclusion dite "en peigne" ou "Platinum quartz" (Koivula & Tannous 2003b).

Cette inclusion était censée être de la brookite et du rutile en épitaxie. Après plusieurs analyses effectuées sur le Raman à transformée de Fourier et le Raman dispersif, nous avons eu un seul et même résultat, l'inclusion est composée uniquement de rutile.

Pour les deux échantillons AB05 et AB06, inclusion de cristobalite dans l'améthyste (Gübelin & Koivula, 2005).

Nous avons recherché en vain, une éventuelle présence de cristobalite dans l'améthyste. Les tests effectués sur le Raman ont démontré que la fluorite peut se présenter également sous des formes cristallines moins classiques. Ces résultats étayaient les arguments du Professeur E. Fritsch, soutenant l'improbabilité d'une présence de cristobalite en inclusion dans le quartz.

Il ne s'agit que de deux exemples, mais il faut souligner qu'il doit nécessairement y en avoir d'autres.

Enfin, l'intérêt géologique est un point important, les inclusions sont les témoins de la genèse d'un cristal d'autant plus si ces inclusions sont constituées de minéraux rares, elles deviennent nécessairement des marqueurs d'évènement géologiques particuliers, dans des environnements aux conditions rarement rencontrées.

-

BIBLIOGRAPHIE

- AFG. (1992) La microsonde Raman en Gemmologie, N° hors série, ISSN 0398-9011
- Beaton D., Sehgal A. (2015) Chrysocolla in quartz. *Gems&Gemology*, Vol 51, N°1, p.89
- Bishop A.C., Hamilton W.R., Wooley A.R. (2001) Guide des minéraux, roches et fossiles - Delachaux et Niestlé - 336 pages
- Boulliard J.C. (2010) Le cristal et ses doubles - CNRS éditions - p.216-226
- Cesbron F.P., Williams S.A. (1980) Apachite and gilalite, two new copper silicates from Christmas, Arizona. *Mineralogical magazine*, Vol. 43, p.639-641
- Choudhary G. (2011a) Pink cat's-eye quartz with color and chatoyancy caused by tourmaline needles. *Gems&Gemology*, Vol 47, N°3, p.245-246
- Choudhary G. (2011b) Quartz with acicular emerald inclusions. *Gems&Gemology*, Vol 47, N°4, p.323
- Cipriani N. (1996) Minéraux et roches - Gründ - 167 pages
- Cornell R. M., Schwertmann U. (2003) The iron oxides : structure, properties, reactions, occurrences and uses - Second Edition - Wiley-VCH Verlag GmbH & Co - 664 pages
- De Ascençao Guedes R. (2002) Le coteau minier de Panasqueira, Beira Baixa Portugal. *Le règne minéral*, N°43 p.7-31
- Dercourt J., Paquet J., Thomas P., Langlois C. (2006) Géologie, Objets, méthodes et modèles - 12e édition - Dunod - p.91-119
- Fleischer M., Wilcox R., Matzko J. (1984) Microscopic Determination of the Nonopaque Minerals, U.S. Geological Survey Bulletin 1627, p. 62
- Fritsch E. (2001) "Spider" quartz. *Gems&Gemology*, Vol 37, N°3, p.238
- Fritsch E., Lasnier B. (1997) Blue quartz from Madagascar. *Gems&Gemology*, Vol 47, N°1, p.57-58
- Gübelin E.J et Koivula J.I. (2005) Photoatlas of inclusions in Gemstones volume 2 - Opinio - p. 541- 661
- Hyrsl J. (2000) Natural emerald and quartz intergrowth. *Gems&Gemology*, Vol 36, N°2, p.164-165
- Hyrsl J. (2003) Triphylite inclusions in quartz from Brazil. *Gems&Gemology*, Vol 39, N°1, p.61-62
- Hyrsl J. (2004) Graphite inclusions in quartz from Brazil. *Gems&Gemology*, Vol 40, N°4, p.352-353
- Hyrsl J. (2009) "Paraíba" quartz with copper inclusions from Brazil. *Gems&Gemology*, Vol 45, N°1, p.72-73
- Hyrsl J., Danet F. (2005) Bismuthinite inclusions in rose quartz from Madagascar. *Gems&Gemology*, Vol 41, N°2, p.181-182
- Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) Magic world: inclusions in quartz - Bode - 240 pages
- Koivula J.I. (1992) Silver in quartz. *Lapidary Journal*, July, page 22
- Koivula J.I. (1997) Quartz with "rainbow" hematite inclusions and with pyrite inclusions. *Gems&Gemology*, Vol 33, N°1, p.65-66
- Koivula J.I. (2003) Photomicrography For Gemologists. *Gems&Gemology*, Vol 39, N°1, p.16
- Koivula J.I. (2006) "Platinum quartz" with star. *Gems&Gemology*, Vol 42, N°1, p.72
- Koivula J.I. (2007) Citrine with pyrite inclusions. *Gems&Gemology*, Vol 43, N°2, p.166-167
- Koivula J.I., Chadwick K.M. (2008) An interesting rose quartz from Madagascar. *Gems&Gemology*, Vol 44, N°3, p.276-277
- Koivula J.I., Tannous M. (2001) Unusual rutilated quartz. *Gems&Gemology*, Vol 37, N°2, p.146
- Koivula J.I., Tannous M. (2002) Charoite inclusions in a quartz-feldspar rock. *Gems&Gemology*, Vol 38, N°3, p.252
- Koivula J.I, Tannous M. (2003a) More curiosities from Tucson 2003. *Gems&Gemology*, Vol 39, N°3, p.236-237
- Koivula J.I, Tannous M. (2003b) "Platinum quartz". *Gems&Gemology*, Vol 39, N°4, p.334

- Koivula J.I, Tannous M. (2003c) "Quartz crystal with "Lizard" inclusion. *Gems&Gemology*, Vol 39, N°3, p.218
- Koivula J.I, Tannous M. (2003d) Interesting inclusions *Gems&Gemology*, Vol 39, N°2, p.161-162
- Koivula J.I., Tannous M. (2004a) Double-eye chatoyant quartz. *Gems&Gemology*, Vol 40, N°4, p.352
- Koivula J.I., Tannous M. (2004b) Quartz with molybdenite *Gems&Gemology*, Vol 40, N°4, p.353-354
- Koivula J.I, Tannous M. (2004c) Rutile "moth" in quartz. *Gems&Gemology*, Vol 40, N°4, p.353-354
- Koivula J.I., Tannous M. (2004d) Three rutile quartz cat's-eyes. *Gems&Gemology*, Vol 40, N°1, p.63
- Koivula J.I., Tannous M. (2005) Pezzottaite in quartz. *Gems&Gemology*, Vol 41, N°1, p.65-66
- Koivula J.I., Tannous M., DeGhionno D. (2004) Quartz in three colors. *Gems&Gemology*, Vol 40, N°4, p.332-333
- Laurs B.M. (2004) Update on tourmaline and other minerals from Warner Springs, California "pääkkönenite". *Gems&Gemology*, Vol 40, N°2, p.175
- Laurs B.M. (2005) Gold in quartz from Mariposa County, California. *Gems&Gemology*, Vol 41, N°1, p. 58-59
- Laurs B.M. (2011) Quartz with spessartine inclusions. Brazil's. *Gems&Gemology*, Vol 47, N°3, p.245
- Laurs B.M., Nelson D. (2012) Quartz from Tanzania with red epidote piedmontite inclusions. *Gems&Gemology*, Vol 48, N°3, p. 228-229
- Ma C., Goreva J.S., Rossman G.R. (2002) Fibrous nano-inclusions in massive rose quartz : HRTEM and AEM investigations. *American Mineralogist*, Vol 87, p.269-276
- Macri M., Maras A., Moretti P.F., Serracino M. (2006) "Sunset" quartz : a new gem material from Brazil. *Gems&Gemology*, Vol 42, N°4, p.277-278-279
- Macri M., Maras A., Troilo F., Serracino M. (2007) A new gemstone from Italy: "violet quartz". *Gems&Gemology*, Vol 43, N°3, p.262-263
- Macri M., Maras A., Serracino M., Moretti P.F. (2009) Ankaungite and celsian inclusions in quartz from Brazil. *Gems&Gemology*, Vol 45, N°1, p.71-72
- Macri M., Maras A., Serracino M., Albano M. (2011) Blue quartz colored by trolleite and lazulite inclusions. *Gems&Gemology*, Vol 47, N°1, p.57-58
- Mazziotti Tagliani S., Macri M., Stellino S., Maras A., Serracino M. (2010) "Churrasco quartz" with tourmaline and chamosite inclusions from Brazil. *Gems&Gemology*, Vol 46, N°1, p.63
- Medenbach O. (2012) African secrets, the Munich show theme book, Messina p.125
- Messer N., Moelo Y. (2000) La ménéghinite d'entre deux roches. *Le règne minéral, hors série VI*, p.50-51
- Nectoux D., Le Cléac'h J.M., Benhamou C. (2013) *Curiosités minérales, collection du musée de minéralogie Mines Paris Tech - Omniscience - 235 pages*
- Pauling L., Hendricks S. (1925) The structure of Hematite and Corundum. *Journal of the American Chemical Society* 47, p.781-790
- Pighini C. (2006) Synthèse de nanocristaux de TiO₂ anatase à distribution de taille contrôlée. Mémoire de thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, France, p.13
- Pomerol C., Lagabrielle Y., Renard M., Guillot S. (2011) *Éléments de géologie - 14e édition - Dunod - p.496-513*
- Pradat T., Rondeau B., Fritsch E. (2011) Chatoyant quartz with cinnabar inclusions. *Gems&Gemology*, Vol 47, N°4, p.322-323
- Quinn E.P. and SFM. (2005) Covellite in quartz. *Gems&Gemology*, Vol 41, N°1, p.47-48
- Renfro N. (2009) Pumpellyite in quartz, *Gems&Gemology*, Vol 45, N°3, p.211-212
- Renfro N. (2012) Quartz with green rutile inclusions, *Gems&Gemology*, Vol 48, N°3, p.227-228
- Rondeau B. (1998) Origine de la couleur et structure des opales communes. Mémoire de DUG, Université de Nantes, France, p.29

Rondeau B., Macri M. (2005) "Medusa quartz" with gilalite inclusions. *Gems&Gemology*, Vol 41, N°3, p.271-272

Rossmann G.R., Chi Ma., Kampf A.R. (2011) Quartz carving with inclusions of izoklakeite. *Gems&Gemology*, Vol 47, N°4, p.324-325

Shepherd T.J., Rankin A.H., Alderton D.H.M. (1985) *A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies* - Blackie, Chapman & Hall - 224 pages

Taga M., Kono T., Yamashita N. (2011) Photoluminescence properties of gypsum. *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences*, Vol 16, p. 169-174

Tischendorf G., Förster H.J., Gottesmann B., Rieder M. (2007) True and brittle micas: composition and solid-solution series. *Mineralogical Magazine*, Vol. 71, p.285-320

Les sites internet visités :

Anthony J.W., Bideaux R.A., Bladh K.W., Nichols M.C. *Handbook of Mineralogy* (2002). (<http://www.handbookofmineralogy.org/search.html?p=all>). Consulté de juin à octobre 2014.

Akhavan A.C. The quartz page (2011). (<http://www.quartzpage.de/intro.html>). Consulté en janvier, février et mars 2014.

Barmarin G. Tout savoir sur la luminescence des minéraux (2009). (<http://www.fluomin.org/fr/accueil.php>). Consulté en janvier et février 2014.

Deferne J. Presque tout sur le quartz (2014). (http://www.kasuku.ch/pdf/Le_quartz.pdf). Consulté en mars 2014.

Dubois M. Les grandes étapes du développement de l'étude des inclusions fluides (2003). (<https://halshs.archives-ouvertes.fr/hal-00916750/document>). Consulté en avril 2014.

Frost R.L., Xi Y. Raman spectroscopic study of the copper silicate mineral apachite (2012). <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00387010.2011.653855>, consulté en novembre 2014.

Hatert F. Identification macroscopique des minéraux (2013). (<http://www.minera.ulg.ac.be/pdf/Macoscopie-2013-2014-F.Hatert.pdf>). Consulté en de février à septembre 2014.

Gautier Y. « Anhydrite », *Encyclopædia Universalis* (2014). (<http://www.universalis.fr/encyclopedie/anhydrite>). Consulté en octobre 2014.

Gautier Y. « Gypse », *Encyclopædia Universalis* (2014). (<http://www.universalis.fr/encyclopedie/gypse>). Consulté en octobre 2014.

Gillet P., Thomas P. Quartz en sceptre (2002). <http://planet-terre.ens-lyon.fr/image-de-la-semaine/lmg05-2002-07-15.xml>. Consulté en mars 2014.

Lopes A., Frost R.L., Scholz R., Xi Y., Amaral A. Infrared and Raman spectroscopic characterization of the silicate gilalite (2014). <http://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00387010.2013.817432>, consulté en novembre 2014.

Nespolo M. Le quartz n'est pas "rhomboédrique" - Une transition de phase "géographique" - L'étrange cas du quartz (2005) <http://www.crystallography.fr/pages-perso/Nespolo/fr/quartz.htm> Consulté en décembre 2014.

Pradat T. Quartz à inclusions (2014). (<http://www.gemmo.eu/fr/quartz-a-inclusions.php>). Consulté en janvier 2014.

Rossmann G. Manganese dendrites <http://www.minerals.gps.caltech.edu/files/dendrite/index.html>. Consulté en septembre 2015.

<http://www.gemmology.ch/appellations-interdites-A-B-C.html>. Consulté en janvier 2014.

<http://www.mindat.org> Mineral index

- aluminoceladonite, consulté en octobre 2014.
- apachite, consulté en octobre 2014.
- biotite, consulté en septembre 2014.
- brookite, consulté en juin 2014.

- chrysocolle, consulté en septembre 2014.
- clinochlore, consulté en juin 2014 et septembre 2015.
- cristobalite, consulté en juin 2014.
- covellite, consulté en juin 2014 et septembre 2015.
- fluorite, consulté en juin 2014.
- gilalite, consulté en octobre 2014.
- goethite, consulté en septembre 2015.
- gypse, consulté en octobre 2014 et septembre 2015.
- hématite, consulter en octobre 2014 et septembre 2015.
- lazulite, consulté en septembre 2014.
- lépidocrocite, consulté en octobre 2014.
- rutile, consulté en septembre 2014.

<http://www.ruff.info/> Database of Raman spectra, X-ray diffraction and chemistry data for minerals.

- apachite, consulté en octobre 2014.
- brookite, consulté en juin 2014.
- clinochlore, consulté en juin 2014.
- chrysocolle, consulté en octobre 2014.
- covellite, consulté en septembre 2014.
- cristobalite, consulté en juin 2014.
- fluorite, consulté en juin 2014.
- gypse, consulté en octobre 2014.
- lazulite, consulté en septembre 2014.
- lépidocrocite, consulté en octobre 2015.
- rutile, consulté en septembre 2014.
- xénotime, consulté en septembre 2014 et septembre 2015.

<http://www.handbookofmineralogy.org> et www.webmineral.com, consultés pour les formules chimiques des minéraux de janvier à septembre 2014.

www.wikipedia.fr, consulté pour les notes et les références bibliographiques des minéraux.

Listes des références :

Argent

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.634

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.42

Koivula J. (1992) *Silver in quartz*, *Lapidary Journal*, july, p.22

Carbone (graphite)

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.605

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.41-42

Hyrsl J. (2004) *Gems&Gemology*, Vol 40, N°4, p.352-353

Cuivre

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.594

Hyrsl J. (2009) *Gems&Gemology*, Vol 45, N°1, p.72-73

Or

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.604-605

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.41

Laurs B.M. (2005) *Gems&Gemology*, Vol 41, N°1, p.58-59

Arsénopyrite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.585

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.45-46

Bismuthinite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.586

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.48

Danet F., Hyrsl J. (2005) *Gems&Gemology*, Vol 41, N°2, p.181-182

Chalcopyrite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.590

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.53-54-57

Cinabre

Fritsch E., Pradat T., Rondeau B. (2011) *Gems&Gemology*, Vol 47, N°4, p.322-323

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.27-592

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.53

Cosalite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.595

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.57

Covellite

Quinn E.P. and SFM. (2005) *Gems&Gemology*, Vol 41, N°1, p.47-48

Galène

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.602

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.64

Gersdorffite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.603

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.66

Izoklakeite

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.66

Rossmann G.R., Chi Ma., Kampf A.R. (2011) *Gems&Gemology*, Vol 47, N°4, p.324-325

Jamesonite

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.66-67

Kobellite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.611

Marcassite

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.67

Ménéghinite

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.67

Messer N., Moelo Y. (2000) La ménéghinite d'entre deux roches. Le règne minéral, hors série VI, p.50-51

Molybdénite

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.67-68

Koivula J.I., Tannous M. (2004) *Gems&Gemology*, Vol 40, N°4, p.353-354

Pääkkönenite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.619

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.68

Laurs B.M. (2004) *Gems&Gemology*, Vol 40, N°2, p.175

Pyrite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.622-623-624

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.68-69-70-71

Sphalérite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.635

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.72-74

Fluorite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.555

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.79-80-81

Anatase

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.583-584-585

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.85-85-86

Ankangite

Macri M., Maras A., Serracino M., Moretti P.F. (2009) *Gems&Gemology*, Vol 45, N°1, p.71-72

Brookite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.587-588

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.86-87-88

Koivula J.I., Tannous M. (2003) *Gems&Gemology*, Vol 39, N°4, p.334

Cristobalite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.554-555-562

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.89

Goethite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.556-557-558-559-560-604

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.91-92-93-94-95-96-97-98-99

Hématite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.561-562-563-564-565-607-608-609

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.90-91-100-102-103-104-105-106-107

Hollandite

Fritsch E. (2001) *Gems&Gemology*, Vol 37, N°3, p.238

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.610

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.109-111

Lépidocrocite

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.113

Limonite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.644-645

Manganèse

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.644

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.113-114

Rutile

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.627-628-629-630-631

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.116-117-118-119-120-121-122-124-125-126-127-128-129-130-132-133-134-135-136-137

Koivula J.I., Tannous M. (2004) *Gems&Gemology*, Vol 40, N°4, p.353-354

Renfro N. (2012) *Gems&Gemology*, Vol 48, N°3, p.227-228

Ankérite

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.149

Calcite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.588-589

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.149-150

Dolomite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.596-597

Rhodochrosite

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.151-152

Koivula J.I., Tannous M., Muhlmeister S. (2001) *Gems&Gemology*, Vol 37, N°4, p.324

Sidérite

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.152-153

Hambergite

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.146-147

Anhydrite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.585

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.32-33-141-142-144-145-146

Baryte

Hyrs J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.146

Apatite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.585

Hyrs J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.155-156

Lazulite

Fritsch E., Lasnier B. (1997) *Gems&Gemology*, Vol 47, N°1, p. 57-58

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.612

Hyrs J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.154-156-157-158

Lithiophilite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.549-612

Hyrs J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.158

Monazite (Ce)

Hyrs J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.156-157-158

Triphylite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.641

Hyrs J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.158-159

Hyrs J. (2003) *Gems&Gemology*, Vol 39, N°1, p.61-62

Trolléite

Macri M., Maras A., Serracino M., Albano M. (2011) *Gems&Gemology*, Vol 47, N°1, p.57-58

Actinolite

Hyrs J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.161-162-163-164-165-166-167-168

Riebeckite

Hyrs J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.206-207-211-212-213

Émeraude

Choudhary G. (2011) *Gems&Gemology*, Vol 47, N°4, p.323

Hyrs J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.171-175

Hyrs J. (2000) *Gems&Gemology*, Vol 36, N°2, p.164-165

Koivula J.I., McClure S.F. (2008) *Gems&Gemology*, Vol 44, N°3, p.258

Chlorite généralités

Hyrs J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.171-172-173-174-175-176-177-178-179-180-181-182-183

Chamosite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.591-592

Macri M., Maras A., Mazziotti Tagliani S., Stellino S., Serracino M. (2010) *Gems&Gemology*, Vol 46, N°1, p.63

Clinochlore

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.593

Cookéite

Hyrs J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.187

Albite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.599-600-601

Hyrs J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.190-191

Grenat

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.603-634-635

Hyrs J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.191-192-196-197-198-199

Koivula J.I., Tannous M. (2003) *Gems&Gemology*, Vol 39, N°2, p.161-162

Laurs B.M. (2011) *Gems&Gemology*, Vol 47, N°3, p.245

Biotite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.615-618

Hyrs J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.195-202

Céladonite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.615-616

Fuchsite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.615-616

Aegirine

Hyrs J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.162

Diopside

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.596

Hédenbergite

Hyrs J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.195-196-200-201

Violane

Macri M., Maras A., Troilo F., Serracino M. (2007) *Gems&Gemology*, Vol 43, N°3, p.262-263

Elbaïte indicolite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.638-640

Koivula J.I., Tannous M. (2003) *Gems&Gemology*, Vol 39, N°1, p.44-45

Elbaïte rose

Choudhary G. (2011) *Gems&Gemology*, Vol 47, N°3, p.245-246

Hyrs J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.216-217

Elbaïte verdélite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.639

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.218

Tourmaline noire

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.640

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.216-217-218-219-220-221-222-223-224-225-226-227

Ajoïte

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.208-209-210

Koivula J.I., Tannous M. (2003) *Gems&Gemology*, Vol 40, N°4, p.332-333

Astrophyllite

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.169-170

Koivula J.I., Tannous M. (2003) *Gems&Gemology*, Vol 39, N°2, p.161-162

Charoïte

Koivula J.I., Tannous M. (2002) *Gems&Gemology*, Vol 38, N°3, p.252

Diopside

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.595

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.185-187

Dumortierite

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.187

Ma C., Goreva J.S., Rossman G.R. (2002) *Fibrous nanoinclusions in massive rose quartz : HRTEM and AEM investigations. American Mineralogist*, Vol 87, p.269-276

Épidote

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.597-598

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.187-188-189-190

Gilalite

Rondeau B., Macri M. (2005) *Gems&Gemology*, Vol 41, N°3, p.271-272

Helvite

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.605-606

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.196-199

Koivula J.I., Tannous M. (2003) *Gems&Gemology*, Vol 39, N°2, p.161-162

Montmorillonite

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.205

Népouite

Koivula J.I., Tannous M., De Ghionno D. (2004) *Gems&Gemology*, Vol 40, N°4, p.332-333

Papagoïte

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.611-620

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.206-207-208

Pezzotaïte

Koivula J.I., Tannous M. (2005) *Gems&Gemology*, Vol 41, N°1, p.65-66

Pyrophyllite

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.206

Pyroxmangite

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.206

Shattuckite

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.206

Sphène

Gübelin E.J., and Koivula J.I. (2005) *Photoatlas of inclusions in Gemstones*, Vol 2, p.637

Hyrsl J., Niedermayr G. (2003) *Magic world: inclusions in quartz*, p.214-215

Les liens photos :

Spires hélicoïdales page 3 : www.sketchfab.com
Argent natif page 9 : <http://sharonelainethompson.com/wp-content/uploads/2014/06/Silver-in-Quartz-Koivula.pdf>
Or page 9, photo de A. Tuma : <http://www.mindat.org/photo-260724.html>
Cosalite page 10, photo de R. Lavinsky : <http://www.mindat.org/photo-237634.html>
Galène page 10 : <http://www.johnbetts-fineminerals.com/jhbnyc/mineralmuseum/picshow.php?id=50063>
Gersdorffite page 10, photo de I. Savin : <http://www.mindat.org/photo-340971.html>
Jamesonite page 10, photo de T. Pradat : <http://www.gemmo.eu/fr/quartz-a-inclusions.php>
Marcassite page 11, photo de T. Pradat : <http://www.gemmo.eu/fr/quartz-a-inclusions.php>
Ménéghinite page 11, photo de D. Journet : <http://galerie-photos.micromineral.org/picture.php?/522/category/12>
Molybdénite page 11, photo de E. Gavrilenko : <http://gem-sphalerite.com/inclusions-in-quartz-all-varieties/201-molybdenite-inclusions-quartz-0347>
Pyrite page 11, photo de E. Gavrilenko : <http://gem-sphalerite.com/inclusions-in-quartz-all-varieties/110-pyrite-inclusions-quartz-5671>
Anatase page 12, photo de K. Larsen : <http://geogallery.si.edu/index.php/en/10209923/quartz-with-anatase>
Goethite page 12, photo de T. Pradat : <http://www.gemmo.eu/fr/quartz-a-inclusions.php>
Lépidocrocite page 13, photo de T. Pradat : <http://www.gemmo.eu/fr/quartz-a-inclusions.php>
Rutile page 13, photo de T. Pradat : <http://www.gemmo.eu/fr/quartz-a-inclusions.php>
Ankérite page 13 : <http://www.gemgazer.com/quartz-with-ankerite-inclusion-cabochon-brazil--8559cts-381-p.asp>
Calcite page 13 : <http://gems-inclusions.com/inclusions-photo-gallery/by-included-mineral/calcite-inclusions/>
Dolomite page 14, photo de T. Pradat : <http://www.gemmo.eu/fr/quartz-a-inclusions.php>
Anhydrite page 14 : <http://www.danweinrich.com/pakistanquartz.htm>
Sidérite page 14 : <http://www.minfind.com/mineral-227753.html>
Hambergite page 14, photo de R. Lavinsky : <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hambergite-Quartz-20361.jpg>
Baryte page 14 : <http://alpes.escapades.free.fr/GrandesRousses.html>
Lithiophilite page 15 : photo de T. Pradat : <http://www.gems-plus.com>
Trolléite page 15 : photo de T. Pradat : <http://www.gemmo.eu/fr/quartz-a-inclusions.php>
Actinolite page 15 : photo de T. Pradat : <http://www.gems-plus.com>
Clinochlore page 16 : photo de K. Larsen : <http://geogallery.si.edu/index.php/en/10209983/quartz-with-clinocllore>
Cookéite page 16 : photo de T. Pradat : <http://www.gemmo.eu/fr/quartz-a-inclusions.php>
Biotite page 17 : photo de E. Gavrilenko : <http://gem-sphalerite.com/inclusions-in-quartz-all-varieties/181-biotite-inclusions-quartz-1468>
Céladonite page 17 : <http://www.thegemtrader.com/Nov11QCeladonitePage.htm>
Fuchsite page 17 : photo de T. Pradat : <http://www.gems-plus.com>
Aégerine page 17 : <http://www.johnbetts-fineminerals.com/jhbnyc/mineralmuseum/picshow.php?id=54663>
Hédenbergite page 17 : photo de T. Pradat : <http://www.gemmo.eu/fr/quartz-a-inclusions.php>
Tourmaline page 18 : photo de T. Pradat : <http://www.gemmo.eu/fr/quartz-a-inclusions.php>
Ajoïte page 18 : photo de T. Pradat : <http://www.gemmo.eu/fr/quartz-a-inclusions.php>
Charoïte page 19 : photo de T. Pradat : <http://www.gemmo.eu/fr/quartz-a-inclusions.php>
Dumortierite page 19 : photo de T. Pradat : <http://www.gemmo.eu/fr/quartz-a-inclusions.php>
Epidote page 19 : photo de T. Pradat : <http://www.gemmo.eu/fr/quartz-a-inclusions.php>
Montmorillonite page 20, photo de R. Lavinsky : <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Montmorillonite-Quartz-ck29b.jpg>
Papagoïte : <http://www.johnbetts-fineminerals.com/jhbnyc/mineralmuseum/picshow.php?id=56572>
Pyrophyllite : <http://gems-inclusions.com/shop/category/by-included-mineral/pyrophyllite/>
Shattuckite page 20 : <https://crystalclassics.co.uk/news-story.php?id=74>
Sphène page 20 : <http://www.johnbetts-fineminerals.com/jhbnyc/mineralmuseum/picshow.php?id=21494>
Sugilite page 20, photo de R. Lavinsky : <http://www.mindat.org/photo-49232.html>
Clinochlore page 25 : <https://www.mineralienatlas.de/lexikon/index.php/MediaDataShow#Medientabelle100>
Chrysocolle page 34 : <http://www.irocks.com/minerals/specimen/39000>
Fluorite page 40 : <http://www.irocks.com/minerals/specimen/1453>
Covellite page 41 : <http://www.dakotamatrix.com/content/butte-mineral-specimens>
Gypse page 51 : <http://www.minerals.net/mineral/gypsum.aspx>
Gilalite page 54 : <http://www.mindat.org/min-1691.html>
Apachite page 54 : <http://rruff.info/Apachite>
Aluminocéladonite page 59 : <http://www.mindat.org/photo-220349.html>
Lépidocrocite page 65, photo de S. Wolfsried : <http://www.mindat.org/photo-98305.html>

REMERCIEMENTS

Je remercie le Professeur Emmanuel Fritsch pour la qualité de son enseignement, sa grande générosité intellectuelle et sa disponibilité en toute simplicité.

Je remercie le Docteur Benjamin Rondeau, Maître de Conférences pour sa patience, sa rigueur et ses conseils avisés tout au long de ce mémoire.

Je remercie ma promotion de DUG année 2013-2014 pour tous les bons moments passés ensemble.

Mes remerciements vont également à ma famille, pour leur présence et le soutien qu'ils m'ont apporté durant l'année et la rédaction de ce mémoire.

J'exprime aussi ma reconnaissance à Messieurs les membres du jury pour avoir accepté de juger ce travail.