

2013 / 2014

DIPLÔME D'UNIVERSITE DE GEMMOLOGIE

Présenté

Devant l'Université de Nantes

U.F.R. Des Sciences et des Techniques

Par

M. Quentin DARTOIS

LA PIERRE DE LUNE DE BIRMANIE

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	Professeur, Président
M. B. RONDEAU	Maître de Conférences, Vice-Président
M. F. NOTARI	Directeur GGTL, Examineur
M. C. EWELS	Chargé de Recherche, Examineur
M. Y. MORIZET	Maître de Conférence, Examineur
M. S. KARAMELAS	GRS Senior Researcher, Examineur
M. B. LASNIER	Professeur émérite, Invité

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier pour la qualité et la densité de leurs enseignements Messieurs les Professeurs :

Emmanuel Fritsh et Benjamin Rondeau de l'université de Nantes, Franck Notari du GemTechLab à Genève, Stephanos Karampelas du laboratoire Gübelin à Lucerne.

Je remercie plus particulièrement M. Fritsh pour le prêt de certains échantillons analysés. Mais aussi M. Rondeau pour son aide précieuse à la rédaction de ce mémoire.

Les ingénieurs de l'IMN, Messieurs Jean Yves Mevellec et Nicolas Stephant, pour leur patience et leurs bons conseils afin de pouvoir réaliser des analyses de qualités en spectroscopie et au MEB.

Messieurs Laurent Lenta et Hervé Loyen, Lithopréparateurs à l'université de Nantes pour leur enthousiasme à la préparation des échantillons.

Ma famille pour son soutien et la patience de ma fille Elora qui n'avait pas forcément son papa à disposition.

Mais aussi tous mes collègues partageant cette promotion 2013 / 2014 pour leur bonne humeur et leur enthousiasme.

## GLOSSAIRE

**Absorption** : Interaction entre les électrons et la lumière, cette lumière devient une énergie thermique invisible et n'est donc pas transmise à travers le matériau.

**Adularescence** : Phénomène d'iridescence propre à la pierre de lune, également appelé « effet Schiller ». Il en résulte une diffusion de la lumière dans plusieurs directions et de différentes intensités.

**Anisotrope** : Différentes propriétés dans les différentes directions du matériau.

**Biaxe** : Un cristal est dit biaxe lorsque qu'il possède deux axes optiques de simple réfraction.

**Biréfringence** : Uniquement présent dans les cristaux anisotropes ; il s'agit de l'écart numérique maximal entre les deux indices de réfraction.

**Clivage** : Séparation le long de plans bien définis du réseau cristallin.

**Exsolution** : Séparation d'une solution en deux phases de même composition globale.

**Iridescence** : Phénomène relevant de la réflexion de la lumière blanche sur de fines couches (feldspath par exemple) ou dans la structure interne d'une gemme.

**Labradorescence** : Phénomène de diffraction propre à la labradorite.

**Luminescence** : Emission de lumière visible par un matériau suite à une excitation, le plus souvent une lampe UV.

**Perthite** : Cristal composé à la fois de feldspath sodique et de feldspath potassique, généralement constitué d'un cristal de feldspath potassique contenant de fines lamelles d'albite. Se forme suite au refroidissement d'une phase cristalline sodipotassique homogène. Ce nom est réservé uniquement aux exsolutions des feldspaths alcalins. Lorsque celles-ci sont visible uniquement à l'aide d'un microscope ou d'un microscope électronique on les appellera alors micropertthites ou cryptopertthites.

**Pléochroïsme** : Absorption sélective différentielle de la lumière selon l'orientation cristalline. Peut être dichroïque (deux couleurs) ou trichroïque (trois couleurs).

## SOMMAIRE

<b>Avant propos :</b>	page 6
<b>Introduction :</b>	page 7
<b>Etat des connaissances :</b>	page 8
I) Morphologie et macles	page 11
II) Propriétés physiques	page 12
III) Propriétés optiques	page 12
IV) Irisation et effet Schiller	page 13
V) Inclusions présentes dans la pierre de lune	page 14
VI) Caractéristiques spectroscopiques	page 16
<b>Matériaux et méthodes :</b>	page 19
<b>Résultats :</b>	
I) <u>Gemmologie classique :</u>	page 24
1) Inclusions visible au microscope	page 25
2) Luminescence au rayonnement Ultra Violet	page 45
3) Angle d'extinction	page 45
II) <u>Techniques de laboratoire :</u>	
1) Spectrométrie UV-VIS :	page 46
2) Spectrométrie infrarouge :	page 46
3) Spectrométrie RAMAN :	
3.1) Nature du feldspath	page 47
3.2) Nature des inclusions	page 49
4) Microscope Electronique à Balayage (MEB)	page 51

**Discussion :** page 54

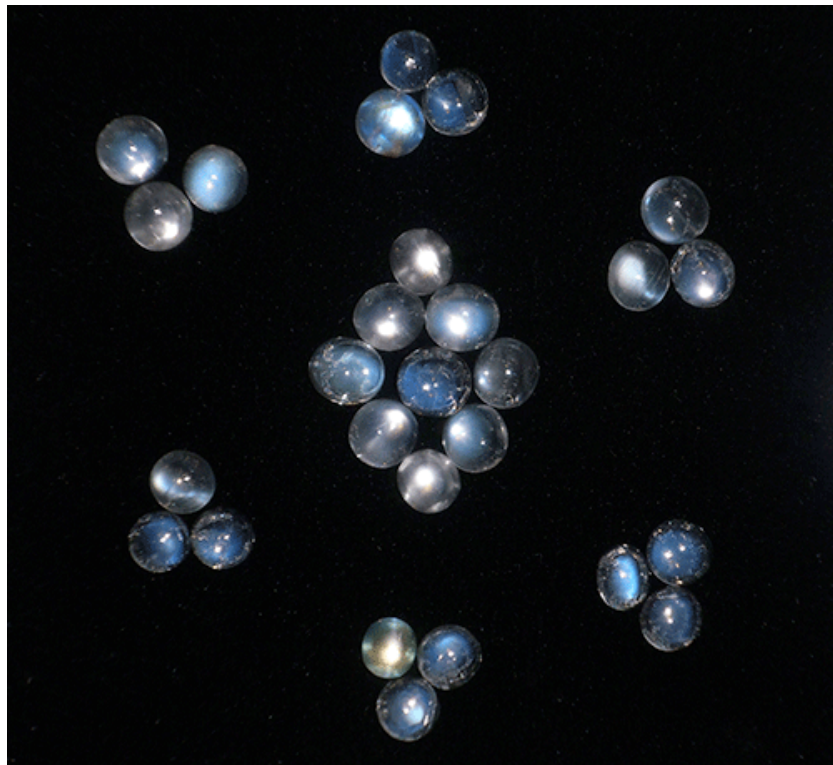
**Conclusion et Perspectives :** page 55

**Références bibliographiques :** page 56

**Annexes :** page 58

## AVANT PROPOS

Lors d'un de mes voyages en Thaïlande, plus précisément à Mae Sot, une vendeuse de pierre originaire de Birmanie me montra une vingtaine de feldspaths dont certains exprimaient une belle adularescence. Elle me certifia que ces pierres provenaient de Birmanie plus précisément de la région de Mogok. Ayant entendu parler d'un gisement de pierre de lune découvert peu d'années auparavant, et étant fasciné par les effets de diffusion de la lumière je me portais donc acquéreur de ce lot de pierre afin d'enrichir ma collection personnelle (figure1).



*Figure 1: lot de 27 Pierres de Lunes achetées en Avril 2012 à Mae Sot, Thaïlande (photographie : Q. Dartois).*

## INTRODUCTION

La Birmanie, très connue pour sa production de gemmes exceptionnelles comme les corindons ou les spinelles fournit aussi en très bonne qualité d'autres pierres telles que les feldspaths. On peut trouver six variétés de feldspath sous forme de gemmes : l'andésine, la labradorite, la pierre de soleil, la pierre de lune, l'amazonite et l'orthose.

Dans la gemmologie classique la distinction entre pierres faisant partie d'un groupe isomorphe peut rendre difficile la mise en évidence de différentes variétés, par exemple il est difficile de séparer les pierres de lune des labradorites qui peuvent être très semblables selon la manière dont elles diffusent la lumière (exemple les «pierres de lune arc en ciel»). La composition chimique permet de déterminer si il s'agit d'un alcalin ou d'un plagioclase. Le type de diffusion de la lumière, adulescente ou labradrescente, peut également nous mettre sur la voie. Cette diffusion propre aux pierres de lune plus connue sous le nom « d'effet Schiller » est un des aspects les plus caractéristiques et intéressants de cette variété (figure 2).

Le choix d'étudier ces pierres en provenance de Birmanie est tout d'abord d'un intérêt personnel afin de savoir s'il s'agit effectivement d'alcalin ou de plagioclase. Mais aussi d'essayer de renseigner un peu plus sur les caractéristiques de ces gisements Birmans pour pouvoir les comparer à d'autres gisements fournisseurs de pierres de lune tel que le Sri Lanka ou Madagascar.

Nous avons choisi d'effectuer cette étude de laboratoire afin de déterminer la nature de ces feldspaths (alcalins ou plagioclases) mais aussi de révéler si certaines de ces caractéristiques permettent de mieux recenser et éventuellement comparer les pierres de lunes d'autres gisements, Sri Lanka ou Madagascar.



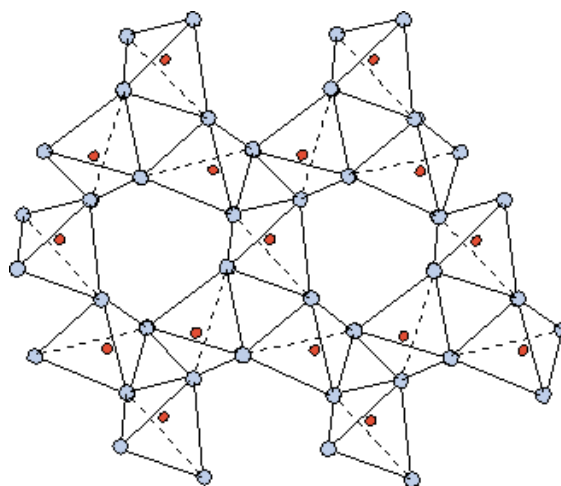
Figure 2 : échantillon brut de pierre de lune extrait d'un gisement birman. Collection Université de Nantes.

## ETAT DES CONNAISSANCES

Avec ses 676 578 km<sup>2</sup> la Birmanie est le plus grand pays de l'Asie du Sud Est. En contact avec les plaques indiennes, eurasiennes, de la Sonde et australiennes, la plaque birmane relève d'une histoire géologique complexe. Un ordre séquentiel d'événements résumé en 39 étapes allant du Précambrien au Quaternaire permet un apport en éléments riches et diversifiés facilitant la croissance de nombreux minéraux et cristaux différents et de bonnes qualités générales (Pramumijoyo & al, 2010).

Les feldspaths font partie des minéraux les plus présents au sein de la croûte terrestre. Il s'agit de silicates d'aluminium du groupe des tectosilicates de formule chimique :  $K Al Si_3 O_8$  pour l'orthose,  $Na Al Si_3 O_8$  pour l'albite et  $Ca Al_2 Si_2 O_8$  pour l'anorthite. Leur structure est composée de tétraèdres  $\{SiO_4\}$  et  $\{AlO_4\}$  (figure 3) partageant tous leurs sommets afin de former une charpente tridimensionnelle laissant toutefois des cavités de forme irrégulière assez grandes pour y loger des ions d'un rayon supérieur à 10 nm (Cesbron 2007).

Figure 3 : schéma des tectosilicates (quartz sur la figure) tétraèdre  $SiO_4$  en volume, avec une mise en commun de tous les oxygènes (Université de Nantes)



Ils font partie d'un groupe isomorphe possédant trois extrémités chimiques : le potassium (K), le sodium (Na) et le calcium (Ca). Formant deux séries isomorphes entre leurs extrémités : les alcalins allant de l'albite à l'orthose, et les plagioclases allant de l'albite à l'anorthite (figure 4 et 5). Dans cette étude nous nous intéressons aux alcalins cristallisants dans le système monoclinique.



## Série isomorphe des feldspaths

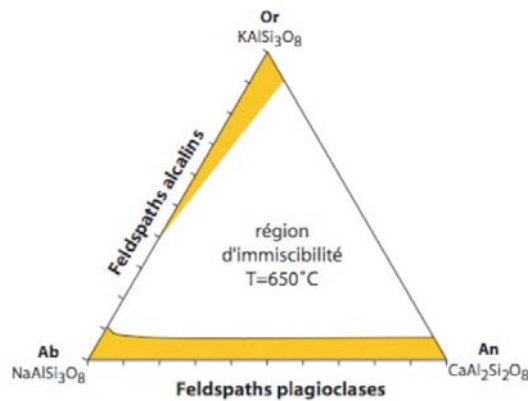


Figure 4 : diagramme ternaire représentant la formation des différents feldspaths, à une température de 650 °C, relié par leurs trois pôles purs : l'albite (Na), l'orthose (K) et l'anorthite (Ca)

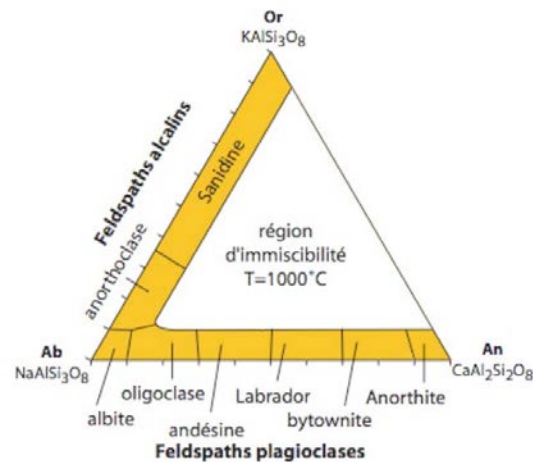


Figure 5 : même diagramme représentant la formation des différents feldspaths, à une température de 1000 °C, relié par leurs trois pôles purs : l'albite (Na), l'orthose (K) et l'anorthite (Ca)

Composant commun des roches volcaniques et des roches plutoniques acides et alcalines, ou argileuses métamorphisées et des gneiss acides, les feldspaths alcalins se déclinent en plusieurs variétés (tableau 1) : l'orthose ou orthoclase  $K Al Si_3 O_8$ , la sanidine  $(K, Na) Al Si_3 O_8$ , le hyalophane  $(K, Ba) Al (Al Si)_3 O_8$ , le microcline  $K Al Si_3 O_8$  et l'anorthoclase ou anorthose  $(Na, K) Al Si_3 O_8$ . A l'exception du microcline et de l'anorthose, on peut distinguer les alcalins des plagioclases par leurs indices de réfraction, l'absence de macles lamellaires et la présence de perthites ou cryptoperthites ainsi que leur densité plus faible (Lebrun 2007). Les perthites se forment lorsque la solution solide (formée à une température d'environ 1000°C)

baisse en dessous de 650 °C (figure 6). Elle finit donc par devenir instable et se séparer en deux phases feldspathiques. Cette exsolution va : soit se diviser en deux cristaux séparés, soit donner une intercroissance des deux phases d'une orientation généralement parallèle à {100}, ce qui donnera une perthite (Cesbron 2007).

	Composition chimique	Système cristallin
<b>Orthose</b>	$K Al Si_3 O_8$	Monoclinique
<b>Sanidine</b>	$(K, Na) (Si, Al)_4 O_8$	Monoclinique
<b>Hyalophane</b>	$(K, Ba) Al (Si, Al)_3 O$	Monoclinique
<b>Microcline</b>	$K Al Si_3 O_8$	Triclinique
<b>Anorthose</b>	$(Na, K) Al Si_3 O_8$	Triclinique

Tableau 1 : Composition chimique et système cristallin des feldspaths alcalins. (Cesbron 2007)

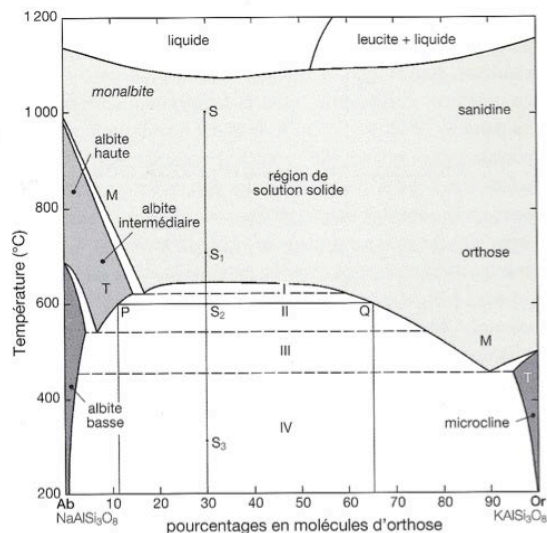


Figure 6 : schéma représentant la formation des feldspaths alcalins selon différentes températures. M et T sont les domaines où le feldspath cristallise dans le système monoclinique ou triclinique. La limite entre la région du solide et du liquide s'appelle courbe du « solvus », c'est en dessous de cette courbe que les perthites commencent à se former. D'après Cesbron 2007.

L'orthose, avec son angle  $2V$  plus grand et la présence de structures microperthitiques, se distingue de la sanidine et de l'anorthose. Reconnaître la sanidine nécessite la mesure de l'angle  $2V$  ou un diffractogramme des rayons X, et par son type distinct de macles permettra de la séparer des plagioclases et du microcline.

La pierre de lune est généralement attribuée à la sanidine cryptoperthitique (figure 7) mais certains échantillons peuvent être attribués à l'orthose ou l'anorthose. Formant à haute température une série continue de solutions solides avec l'albite, la sanidine est généralement constituée de 40 à 80 % mol. d'orthose, 60 à 20 % d'albite et jusqu'à 10 % d'anorthite. Elle peut contenir un peu de baryum (Ba) (jusqu'à 1,5 % de BaO) et de strontium (Sr), ainsi que des traces de  $Fe^{3+}$  et Ti (moins de 0,1 atome pour 32 oxygènes). Lorsque la teneur en sodium (Na) augmente, elle prend le nom de *sanidine sodique* (Lebrun 2007).

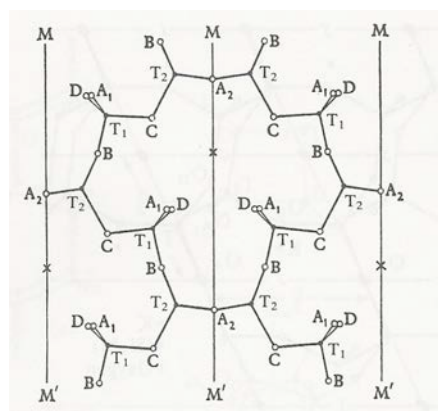


Figure 7 : une partie de la structure de la sanidine, selon le plan  $\{001\}$ .  $MM'$  étant les plans miroirs (Deer & al.1966).

## I) Morphologie & macles

Souvent gênés lors de leur croissance cristalline par la présence de phases déjà cristallisées les cristaux de feldspath sont très majoritairement xénomorphes. Cependant dans certaines roches volcaniques ils peuvent parfois développer un habitus automorphe. La plupart des pierres de lunes gemmes viennent d'une pegmatite (Genot L., 1998).

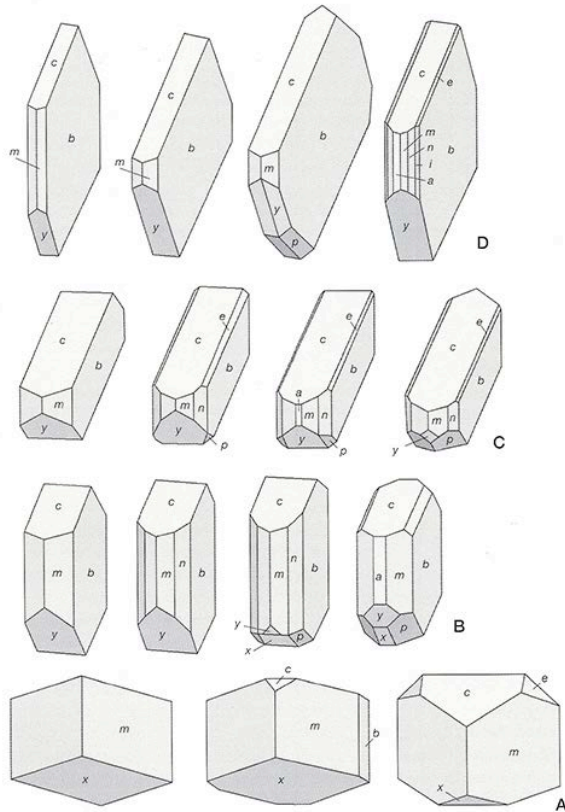


Figure 8 : Principaux habitus de la sanidine haute température, A : « adulaire » ; B : « Carlsbad » ; C : « Baveno » ; D : « cap Finistere » (Woensdregt, 1983).

a {100}, b {010}, c {001}, e {021},  
i {160}, m {110}, n {130}, p { $\bar{1}11$ },  
x { $\bar{1}01$ }, y { $\bar{2}01$ }

Les différences de température et d'environnements chimiques sont associées au changement d'habitus (figure 8). Par exemple, dans des conditions plutôt alcalines une augmentation de la température fera passer l'habitus de type « adulaire » à un habitus de type « Carlsbad ». L'habitus « cap Finistère » quant à lui, se développe aux plus hautes températures. Le développement relatif aux formes {110}, {010} et {001} permettra de déterminer les habitus de feldspaths potassiques. Il est possible d'estimer la température de formation d'un cristal de feldspath potassique en observant le rapport des distances centrales séparant les faces opposées des formes {110} et {010} ( Franke & Ghobarkar, 1982).

Parmi les feldspaths, on dénombre pas loin d'une vingtaine de macles différentes, certaines sont simples et d'autres plus complexes. Certaines se développent uniquement dans le système triclinique, d'autres dans le monoclinique ou dans les deux systèmes cristallins. On peut d'ailleurs citer les plus courantes (figure 9) : macle de Carlsbad, macle du péricline, macles parallèles (7 différentes qui se rencontrent surtout dans les plagioclases sodiques), macle de l'albite (uniquement dans le triclinique), macle de Manebach, macle de Baveno, ainsi que bien d'autres macles plus complexes. Concernant la sanidine et l'orthose, la macle de Carlsbad est la plus fréquente ; néanmoins les macles de Baveno et Manebach peuvent elles aussi être présentes (Deer & al.1966).

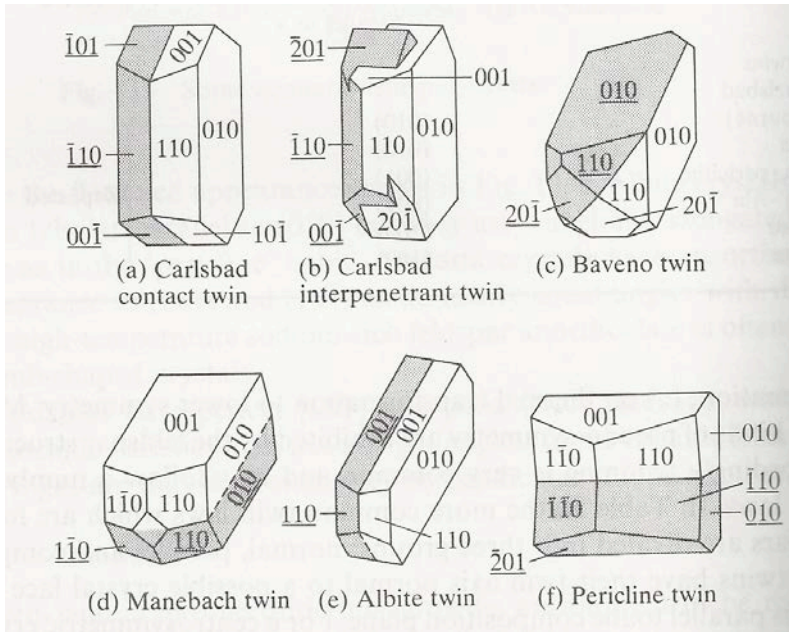


Figure 9 : Macles communes des feldspaths (Deer & al.1966).

## II) Propriétés physiques

Sur l'échelle de Mohs les feldspaths ont la valeur de dureté 6, sachant que celle-ci peut aller jusqu'à 6,5. Chez les alcalins, la cassure est subconchoïdale à inégale ; le clivage est généralement parfait selon le plan  $\{001\}$  bien que sur certains autres plans,  $\{010\}$  et  $\{110\}$ , il peut s'avérer moins parfait. La sanidine, l'orthose et les autres alcalins possèdent des plans préférentiels de fracturation (parting), la plupart du temps parallèles à  $\{100\}$ ,  $\{110\}$ ,  $\{\bar{1}10\}$  et  $\{210\}$ . La proportion molaire d'orthose influe sur la densité des alcalins ce qui leur donne une variation de la densité allant de 2,55 à 2,63 (tableau 2).

	Clivage(s)	parting	cassure	ténacité	dureté	densité
<b>Orthose</b>	$\{001\}$ (parfait), $\{010\}$ (imparfait)	$\{100\}$ , $\{110\}$ $\{\bar{1}10\}$ , $\{201\}$	Subconchoïdale à inégale	fragile	6-6,5	2,55-2,63
<b>Sanidine</b>	$\{001\}$ (parfait), $\{010\}$ (distinct)	$\{100\}$	Subconchoïdale à inégale	fragile	6	2,65-2,62
<b>Anorthose</b>	$\{001\}$ (parfait), $\{010\}$ (moins parfait)	$\{100\}$ , $\{110\}$	inégale	fragile	6	2,57-2,60

Tableau 2 : Récapitulatif des propriétés physiques de l'orthose, la sanidine et l'anorthose (Lebrun P, 2007)

## III) Propriétés optiques

A l'inverse des plagioclases dont les propriétés optiques sont directement liées au rapport albite/anorthite, les alcalins sont affectés par le degré d'ordonnement des atomes de Si et Al à l'intérieur des sites tétraédriques ainsi que par la présence d'intercroissance de matériaux avec des réfractivités différentes ; la substitution de Al par  $Fe^{3+}$ , K et/ou Na par Ca, Ba, Sr ainsi que par la substitution simultanée de Si par Al essentiel au maintien de la neutralité

électrostatique lors de la substitution de cations monovalents par des cations bivalents (Lebrun P, 2007). Généralement les feldspaths sont optiquement biaxes (-) mais il arrive que certain soit biaxes (+), leurs indices de réfraction se situent entre 1,52 et 1,57 ; il est à noter que les alcalins se trouvent plus vers 1,52 - 1,54 alors que les plagioclases sont plus situés entre 1,53 et 1,57 (tableau 3).

	Classe optique	orientation	dispersion	$n_p$	$n_m$	$n_g$	$2V_{mes.}$
<b>Orthose</b>	Biaxes (-)	$n_g = b, n_p \wedge a = 14^\circ/6^\circ, n_m \wedge c = -13^\circ/-21^\circ$	$r > v$ , distinct	1,518-1,520	1,522-1,524	1,522-1,525	$35^\circ/75^\circ$
<b>Sanidine</b>	Biaxes (-)	$n_m = b, n_g \wedge c \approx -20^\circ$ (BT) $n_g = b, n_m \wedge a \approx -21^\circ$ (HT)	$r > v$ ou $r < v$ , faible	1,518-1,524	1,522-1,529	1,522-1,530	$18^\circ/42^\circ$ (BT) $15^\circ/63^\circ$ (HT)
<b>Anorthose</b>	Biaxes (-)	$n_g \wedge b \approx 5^\circ$	$r > v$ , faible	1,524-1,526	1,529-1,532	1,530-1,534	$42^\circ/52^\circ$

Tableau 3 : Récapitulatif des propriétés optiques de l'orthose, la sanidine et l'anorthose (Lebrun P, 2007)

Les orientations optiques ainsi que les angles optiques étant très variables dans la série des alcalins, la mesure de l'angle  $2V$  s'avère un critère important lors de la détermination de l'état structural. Chez les sanidines issues d'une cristallisation à haute température le plan des axes optiques est parallèle à  $\{010\}$  dont l'angle  $2V$  est compris entre  $60^\circ$  et  $0^\circ$ . Pour les sanidines basse température, le plan est normal à  $\{010\}$  et l'angle  $2V$  compris entre  $0^\circ$  et  $36^\circ$  ; généralement il en est de même pour l'anorthose. L'orthose et l'adulaire cristallisant à basse température ou lors d'un refroidissement lent, le plan est normal à  $\{010\}$ , l'angle  $2V$  est entre  $30^\circ$  et  $80^\circ$ . Il est possible également de différencier les alcalins HT des BT (figure 10) par le rapport de l'angle d'extinction et la trace du clivage  $\{001\}$  sur  $\{010\}$  (Tuttle, 1952).

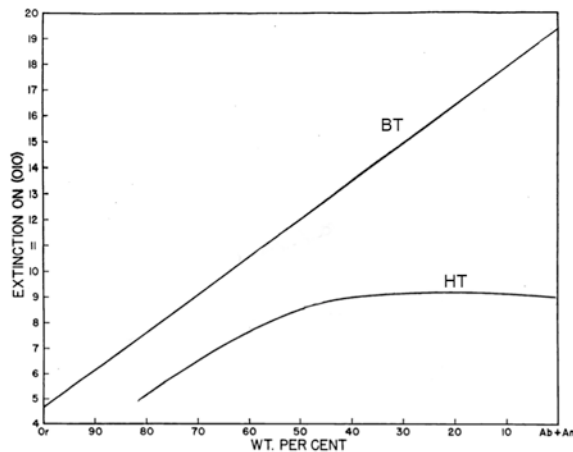


Figure 10 : Relation entre l'angle d'extinction  $\{010\}$  et la composition des feldspaths alcalins (Tuttle, 1952).

#### IV) Iridescence & effet Schiller

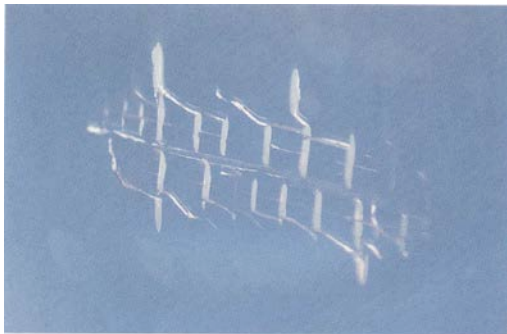
En 1950, Raman & al. décrivaient ainsi l'effet Schiller : « l'effet Schiller de la pierre de lune est un phénomène optique résultant de la diffusion de la lumière dans le cristal ; cette diffusion présente les caractères optiques similaires à ceux observés dans la diffusion de la lumière par les petites particules, mais l'hypothèse d'une structure lamellaire micropertitique provoquant la cause de l'effet ne peut être confirmée » (Raman & al, 1950). Cet effet Schiller

serait donc le résultat de l'hétérogénéité optique dans le feldspath associée à la composition chimique du minéral (Raman & al, 1950).

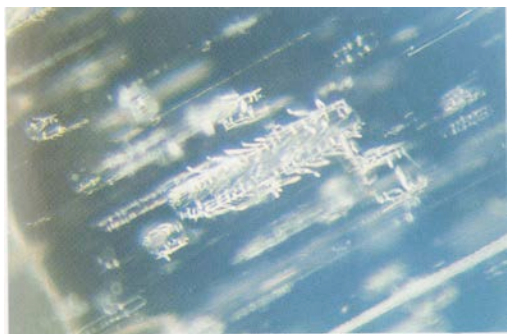
De part leurs structures, les feldspaths peuvent souvent montrer un phénomène d'iridescence ; les alcalins cryptoperthitiques diffusent la lumière et montrent alors une iridescence bleue pâle voir laiteuse. La teneur en Or affecte directement les couleurs reflétées, par exemple, lorsque la teneur en Or passe de Or<sub>20</sub> à Or<sub>70</sub> la teinte de bleu passe à orangé jaunâtre. La composition Or<sub>25-33</sub> est typique du bleu blanchâtre (Lebrun, 2007). Le traitement thermique entre 750° et 1050° fera perdre à ces pierres de lune leur iridescence, leur effet Schiller ainsi que leur structure perthitique (Spencer, 1930).

#### V) Inclusions présentes dans la pierre de lune

Plusieurs inclusions peuvent être présentes dans les pierres de lune ; certaines étant diagnostiques, il peut être facile de les identifier.



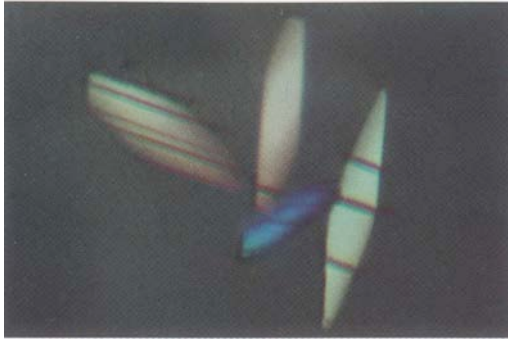
*Figure 11 : x250, fissure typique des pierres de lune, résultant d'une exsolution d'albite dans un feldspath potasso-sodique. (Gübelin & Koivula, 1986).*



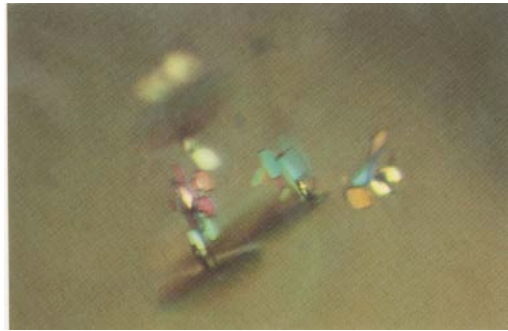
*Figure 12 : x10, cristaux d'albite et leurs fissures liées donnant les inclusions « mille-pattes » diagnostiques de la pierre de lune. (Gübelin & Koivula, 1986).*



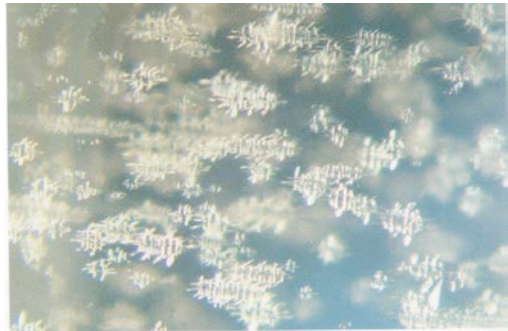
*Figure 13 : x150, lamelles d'albite clairement cristallisée. (Gübelin & Koivula, 1986).*



*Figure 14 : x200, inclusion d'albite ressemblant à des lentilles également diagnostique de la pierre de lune. (Gübelin & Koivula, 1986).*



*Figure 15 : x90, cristal microscopique d'albite présent dans les pierres de lune du « Sri-Lanka ». (Gübelin & Koivula, 1986).*



*Figure 16 : x55, fissure latérale de tension présente dans les pierres de lune de « Meethiyagoda ». (Gübelin & Koivula, 1986).*

## VI) Caractéristiques spectroscopiques

Des études menées par White sur l'absorption et la luminescence du  $Fe^{3+}$  dans les cristaux d'orthose de Madagascar ont mis en valeur les faibles bandes attribuées au champ cristallin de  $Fe^{3+}$  venant se substituer au tétraèdre  $Al^{3+}$  de la structure du feldspath (White. et al., 1986).

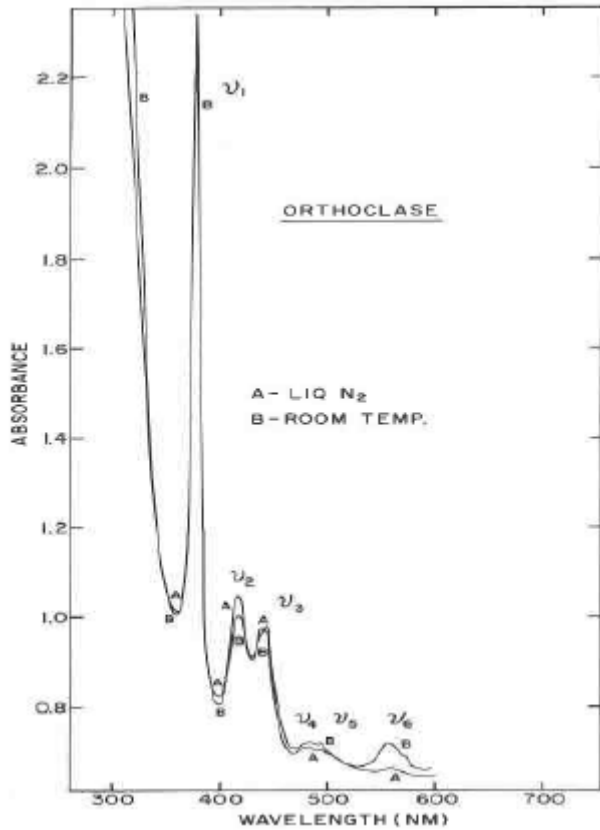


Figure 17 : Nous pouvons voir ici, deux spectres superposés ; un pris à température de 78 Kelvins (A), et l'autre à température ambiante (B). Le  $Fe^{3+}$  laisse apparaître une fine absorption à 350 nm (White. W. et al., 1986).

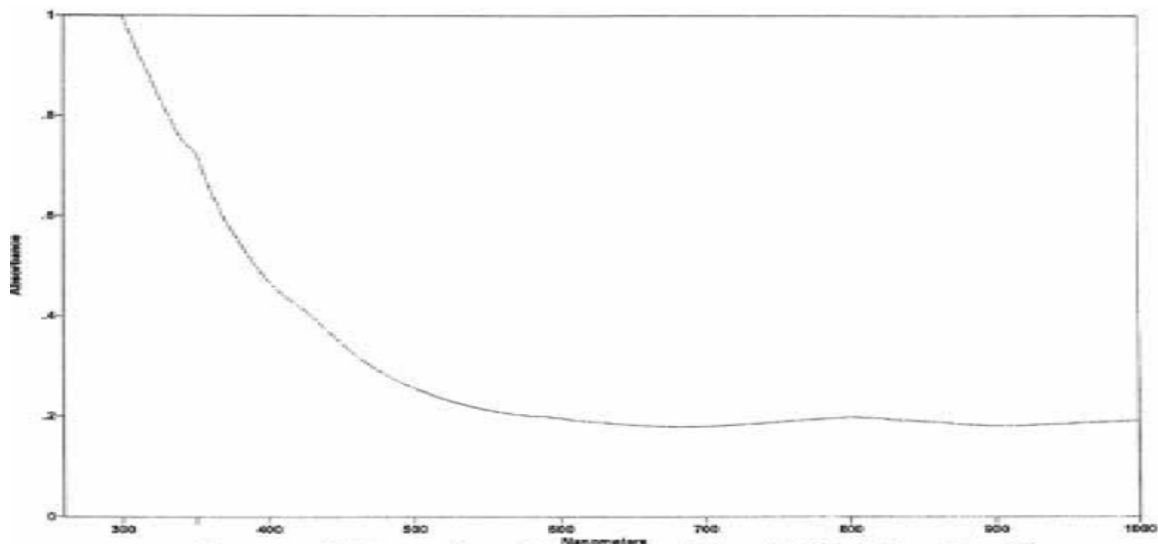


Figure 18 : Spectre UV-VIS d'une pierre de lune bleue, montrant une fine absorption vers 350 nm liée à la présence de  $Fe^{3+}$ . Expliquant ainsi la luminescence rouge aux UV courts (Genot.L., 1998)



La spectrométrie infrarouge laisse apparaître une absorption vers  $900\text{ cm}^{-1}$ ,  $700\text{ cm}^{-1}$  et  $500\text{ cm}^{-1}$ .

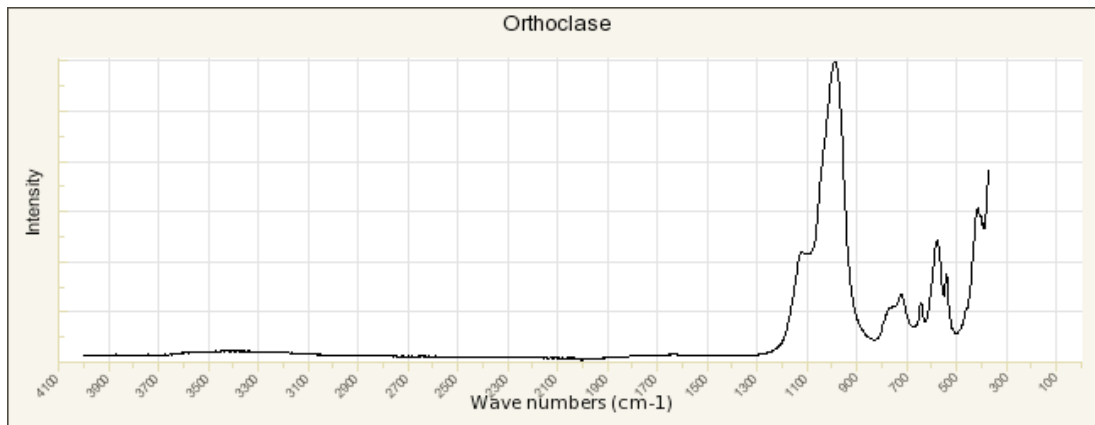


Figure 19 : Spectre infrarouge d'une orthose. (RRuff.info)

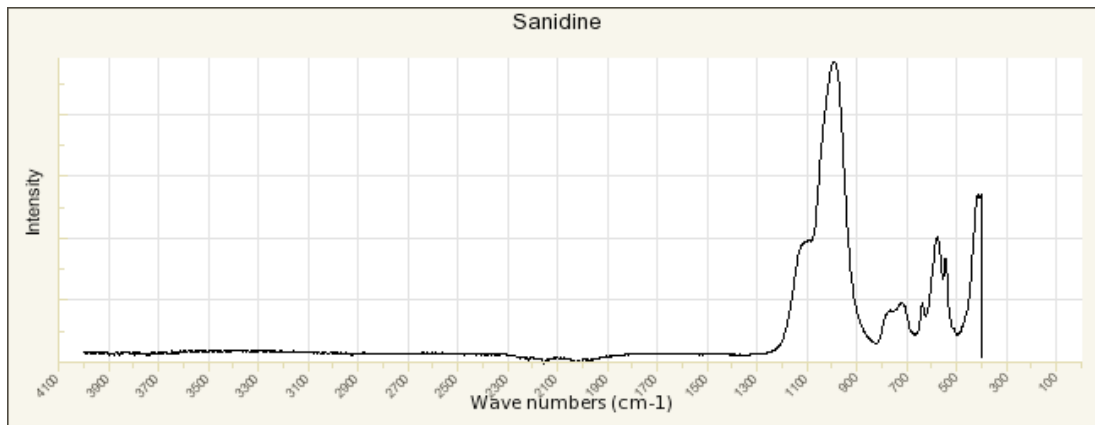


Figure 20 : Spectre infrarouge d'une Sanidine (RRuff.info)

Voici trois spectres Raman montrant la présence du « triplet » à  $514\text{ cm}^{-1}$ ,  $476\text{ cm}^{-1}$  et  $450\text{ cm}^{-1}$  caractéristique des feldspaths alcalins (Genot., 1998). Nous pouvons également remarquer une très grande similitude entre les résultats des spectres d'orthose et de sanidine.

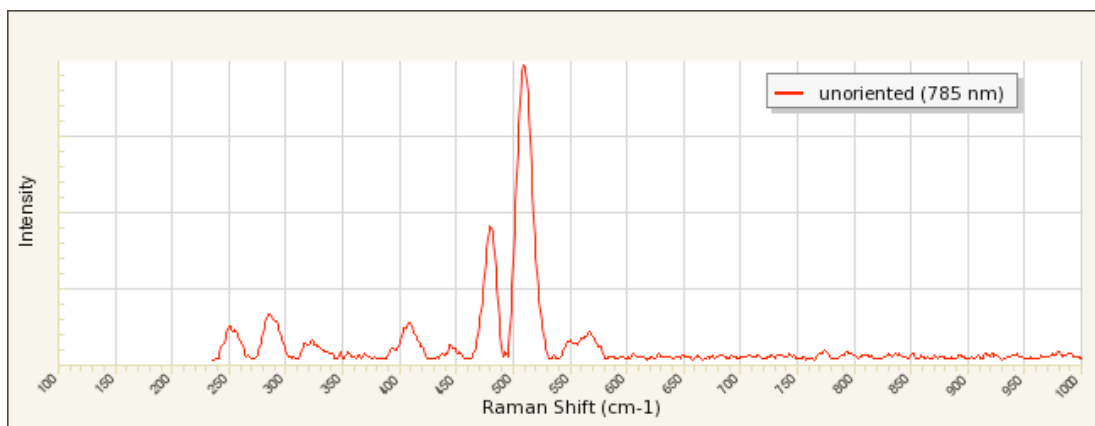


Figure 21 : Spectre Raman d'une albite variété pierre de lune (RRuff.info).

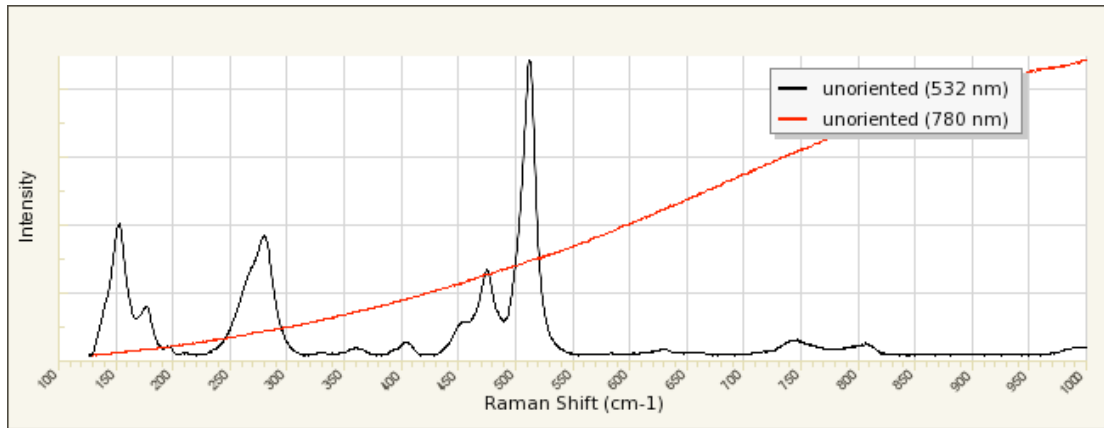


Figure 22 : Spectre Raman d'une orthose (RRuff.info).

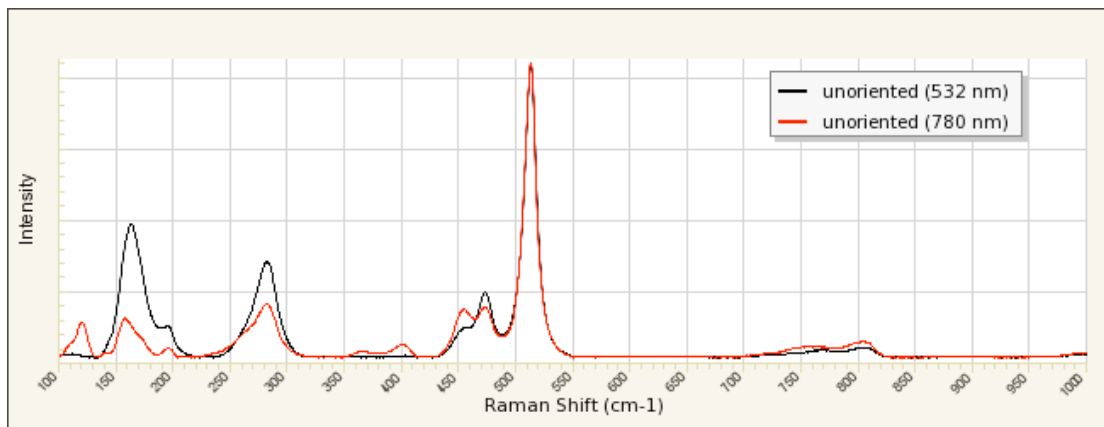














Figure 23 : Spectre Raman d'une sanidine (RRuff.info).







## MATERIAUX ET METHODES

Afin d'avoir un échantillonnage diversifié en adulescence, couleurs et qualités cristallines nous avons sélectionné douze cabochons de pierre de lune parmi le lot montré en figure 1, quatre morceaux de feldspath brut montrant une légère adulescence ainsi que trois spécimens montrant de curieuses inclusions « bambous ».

Ces échantillons venant tous de Birmanie proviennent de différentes sources, les douze cabochons de qualité gemmes on été acheté par nos soins à la frontière birmano-thailandaise. Les trois morceaux de brut on été ramenés par Emmanuel Fritsch directement de la vallée de Mogok. Ceux possédant des inclusions « bambous » (QD17, QD18, QD19), on été acheté à MinerK, marchand de pierres français se fournissant généralement en Birmanie. Avec une apparence plutôt trompeuse (clivage ressemblant à celui des feldspaths et une très très légère opalescence), l'échantillon QD16 a été sorti de ce lot car il s'est avéré être du quartz.

	POIDS	DIMENSIONS	ADULARESCENCE	PHOTOS
<b>QD01</b>	1,20 ct	6 x 3,9 mm	Prononcée (bleue)	
<b>QD02</b>	0,95 ct	6 x 5 x 4 mm	Moyenne (bleue)	
<b>QD03</b>	1,80 ct	6,5 x 5,5 mm	Faible (bleue)	
<b>QD04</b>	1,90 ct	6,8 x 6 x 5,5 mm	Moyenne (bleue)	

<b>QD05</b>	1,05 ct	5,6 x 4 mm	Moyenne (bleue-blanche)	
<b>QD06</b>	0,80 ct	5,9 x 3,2 mm	Moyenne (bleue)	
<b>QD07</b>	1,00 ct	6,3 x 5,5 x 3,7 mm	Légère (blanche)	
<b>QD08</b>	1,35 ct	6,4 x 5,9 x 4,5 mm	Faible (bleue)	
<b>QD09</b>	1,15 ct	5,5 x 4,6 mm	Moyenne (bleue)	
<b>QD10</b>	1,20 ct	6,4 x 6 x 4 mm	Très faible (blanche)	
<b>QD11</b>	1,05 ct	6 x 5,5 x 3,8 mm	Très faible (blanche)	
<b>QD12</b>	1,10 ct	5,7 x 3,9 mm	Moyenne (bleue)	

<b>QD13</b>	13,50 ct	21,5 x 9,1 mm	Faible (bleue)	
<b>QD14</b>	27,60 ct	25 x 22 mm	Moyenne (blanche)	
<b>QD15</b>	14,65 ct	15,9 x 11,1 mm	Aucune	
<b>QD17</b>	13,55 ct	17 x 12 x 9 mm	Prononcée (bleue)	
<b>QD18</b>	17,80 ct	20 x 12 x 8 mm	Prononcée (bleue)	
<b>QD19</b>	19,90 ct	26 x 13 x 7 mm	Moyenne (bleue)	

*Tableau 4 : Description des échantillons*

### Gemmologie classique :

Les instruments utilisés pour la gemmologie classique sont une loupe 10 x pour la sélection des échantillons et un microscope trinoculaire pour l'observation et la photographie des inclusions. Pour le calcul des densités, nous avons utilisé une balance METLER TOLEDO ® X5 104. Pour les propriétés optiques, nous avons utilisé un réfractomètre Topcon® pour mesurer les indices de réfraction et une lampe à Ultra Violet à 254 nm et 365 nm pour examiner la luminescence des pierres. Un dichroscope a été utilisé pour observer le pléochroïsme ainsi qu'un polariscope équipé d'un conoscope pour définir le signe optique. Un microscope pétrographique a été employé pour la mesure de l'angle d'extinction lorsque celui-ci a pu être mesuré.

### Techniques de laboratoire :

Nous avons utilisé un spectroscope UV-VIS de marque UNICAM ® avec une plage d'analyse de 190 à 800 nm afin de mesurer les différentes absorptions produites dans le visible et éventuellement détecter les absorptions responsables de la couleur des pierres. La totalité des spectres ont été pris en transmission. Un spectroscope infra-rouge à transformées de Fourier BRUCKER ® VERTEX 70 (figure 24), avec une plage d'analyse de 5000 à 2000  $\text{cm}^{-1}$ , une résolution spectrale de 4  $\text{cm}^{-1}$ , dont chaque spectre est une accumulation de 100 scans obtenus en transmission.



*Figure 24 : FTIR BRUCKER ® VERTEX 70*

Pour l'analyse des inclusions, un FT Raman BRUCKER ® Multiram (figure 25) utilisé en macro et microscopie avec une plage d'analyses de 0 à 4000  $\text{cm}^{-1}$  et une accumulation de 100 scans pour chaque spectre. Mais aussi une micro-sonde Raman T64000 HORIBA ® (figure 26) avec une plage d'analyses de 100 à 1800  $\text{cm}^{-1}$ , avec un temps de comptage de  $2 \times 20$  s, une ouverture à 100  $\mu$ , un plan focal de 800  $\mu$  et un laser vert d'une puissance de 15 mW (514,53 nm).



Figure 25 : FT Raman BRUCKER ® MULTIRAM

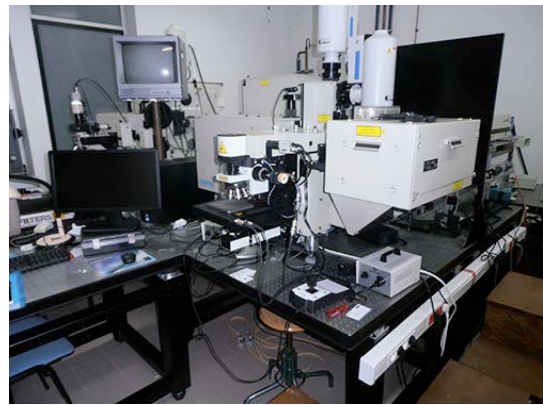


Figure 26 : micro-sonde Raman T64000 HORIBA ®

Afin de pouvoir quantifier les éléments chimiques dans certains échantillons, et faire de l'imagerie à très fort grossissement ; j'ai eu recours à un microscope électronique à balayage MEB JEOL JSM-5800 LV (figure 27) avec une tension d'accélération de 20 keV et un courant de 0,3 nA. La totalité des images présentées sont prises en électrons secondaires.



Figure 27 : MEB JEOL ® JSM-5800 LV

## RESULTATS

### I) Gemmologie classique

Le tableau suivant rassemble les différentes mesures d'indice de réfraction et de densité, ainsi que les observations faites du signe optique et du pléochroïsme. Les autres techniques de gemmologie classique telles que le spectroscope à main ou le filtre chelsea ne communiquant aucun résultat exploitable ne sont pas mentionnées dans le tableau ci-dessous.

Les indices de réfraction sont entre 1,52 et 1,54 mis à part QD01 dont l'indice est un peu plus bas (1,51). Les densités sont comprises entre 2,529 et 2,583. Tous les signes optiques sont bi-axes, dans les échantillons QD13, QD14 et QD15 ils ne sont pas observables. L'adularescence propre aux pierres de lune est présente selon différents degrés et différentes teintes.

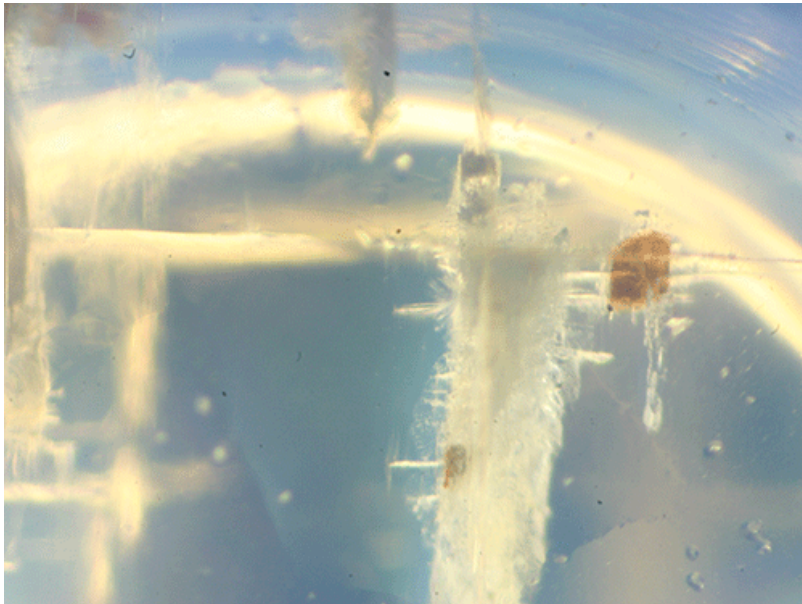
	IR	DENSITE	PLEOCHROISME
<b>QD01</b>	1.51	2,583	Prononcé, dichroïque (incolore - jaunâtre)
<b>QD02</b>	1.52	2,545	Léger, dichroïque (incolore - incolore)
<b>QD03</b>	1.53	2,554	Très léger, dichroïque (incolore - incolore)
<b>QD04</b>	1.52	2,569	Léger, dichroïque (incolore - jaunâtre)
<b>QD05</b>	1.52	2,578	Moyen, dichroïque (incolore - jaunâtre)
<b>QD06</b>	1.54	2,556	Léger, dichroïque (incolore - incolore)
<b>QD07</b>	1.53	2,571	Très léger, dichroïque (incolore - incolore)
<b>QD08</b>	1.54	2,542	Très léger, dichroïque (incolore - incolore)
<b>QD09</b>	1.54	2,532	Léger, dichroïque (incolore - incolore)
<b>QD10</b>	1.54	2,537	Léger, dichroïque (incolore - incolore)
<b>QD11</b>	1.53	2,538	Léger, dichroïque (incolore - jaunâtre)
<b>QD12</b>	1.52	2,543	Léger, dichroïque (incolore - jaunâtre)
<b>QD13</b>	–	2,571	Léger, dichroïque (incolore - jaunâtre)
<b>QD14</b>	–	2,535	Prononcé, dichroïque (incolore - jaunâtre)
<b>QD15</b>	–	2,529	Moyen, dichroïque (incolore - jaunâtre)
<b>QD17</b>	1.54	2,555	Moyen, dichroïque (incolore - jaunâtre)
<b>QD18</b>	1,54	2,559	Prononcé, dichroïque (incolore - jaunâtre)
<b>QD19</b>	1,54	2,551	Moyen, dichroïque (incolore - jaunâtre)

*Tableau 5 : Résumé des mesures et observations prises en gemmologie classique*

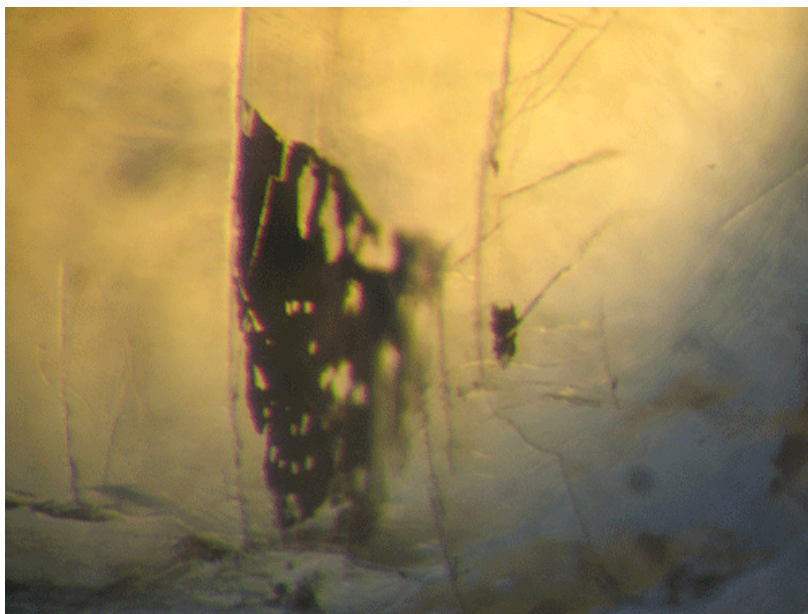


## 1) INCLUSIONS VISIBLES AU MICROSCOPE

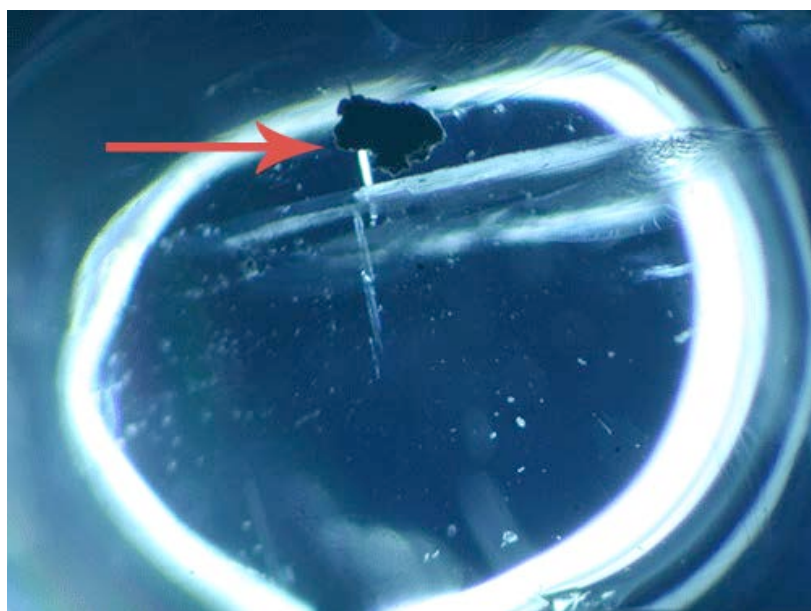
Les observations faites au microscope révèlent de nombreux plans de clivages (QD01, QD02, QD11, QD12) pouvant parfois former une iridescence (QD19), ainsi que des fissures dont certaines semblent former un voile (QD05, QD06). Des inclusions en forme de « flocons de neige » (QD04) ou d'aspect « nuageux » (QD07, QD08) peuvent être visibles à l'œil nu ou à fort grossissement ; mais aussi des restes de ce qui peut être des « tubes » représentés par des séries de cavités plus ou moins grandes (QD12). Des formes de « bambous » (QD07, QD17, QD18, QD19) donnent une certaine originalité à ces pierres. Ces « canaux » peuvent être parfois sectionnés par un clivage (QD18).



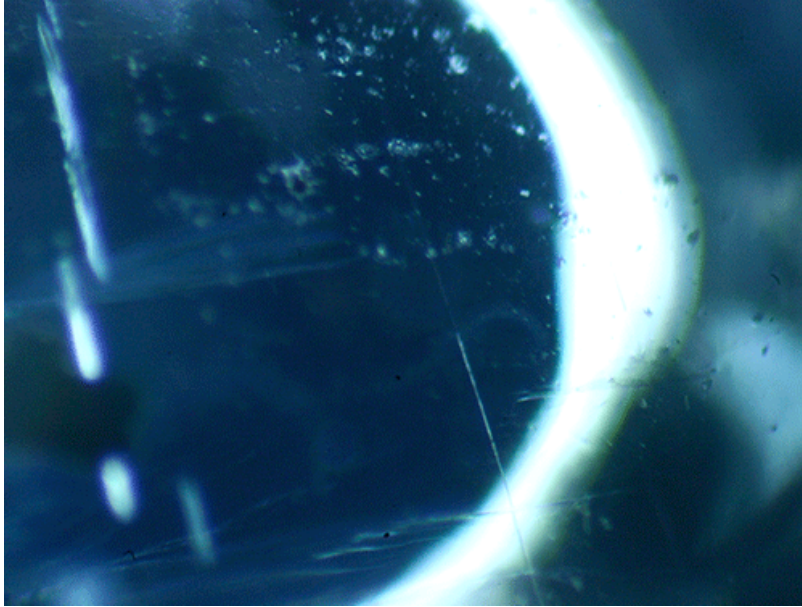
*Figure 28 : fissure le long des plans de clivages avec la présence de quelques impureté, QD01, x40, LT.*



*Figure 29 : fissure affleurant la surface, QD01, x40, LR*



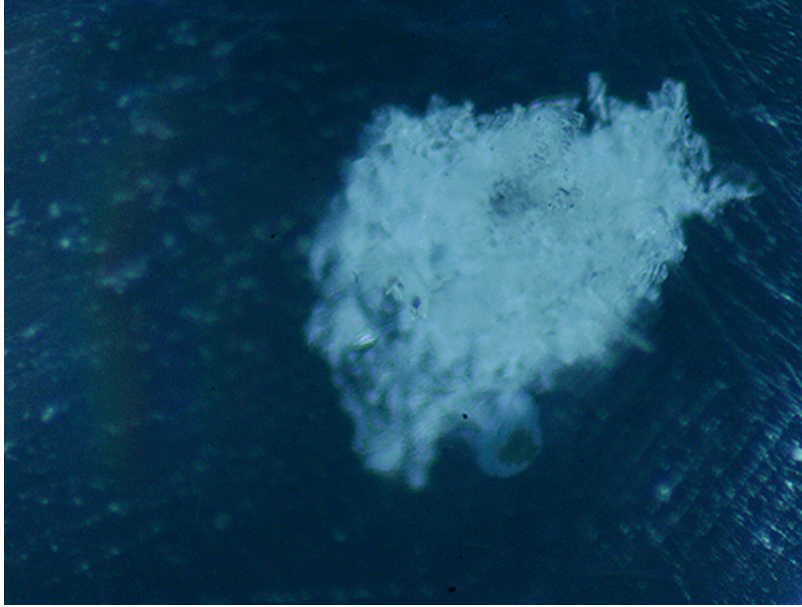
*Figure 30 : impureté organique, apparaissant au premier plan, et séparation le long des plans de clivages, QD02, x20, LT*



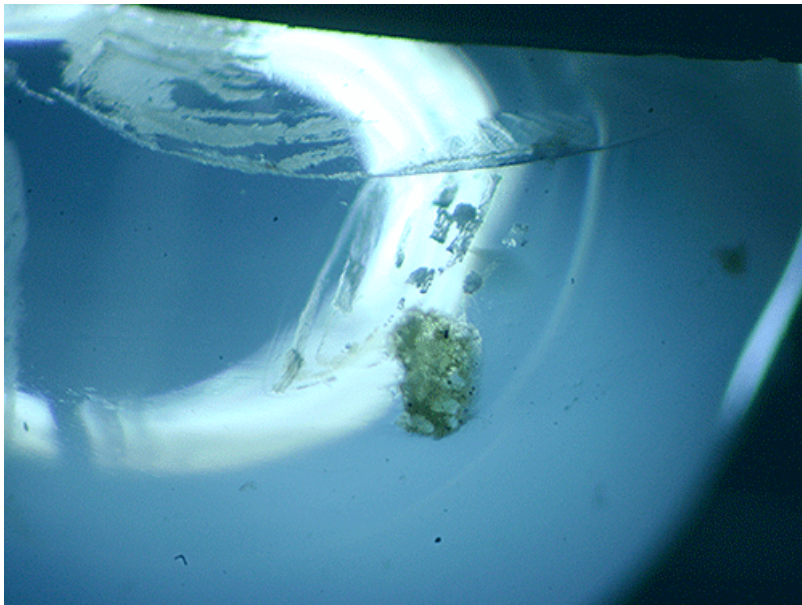
*Figure 31 : fracture du clivage le long de (001), et quelques inclusions d'albite, QD02, x40, LT*



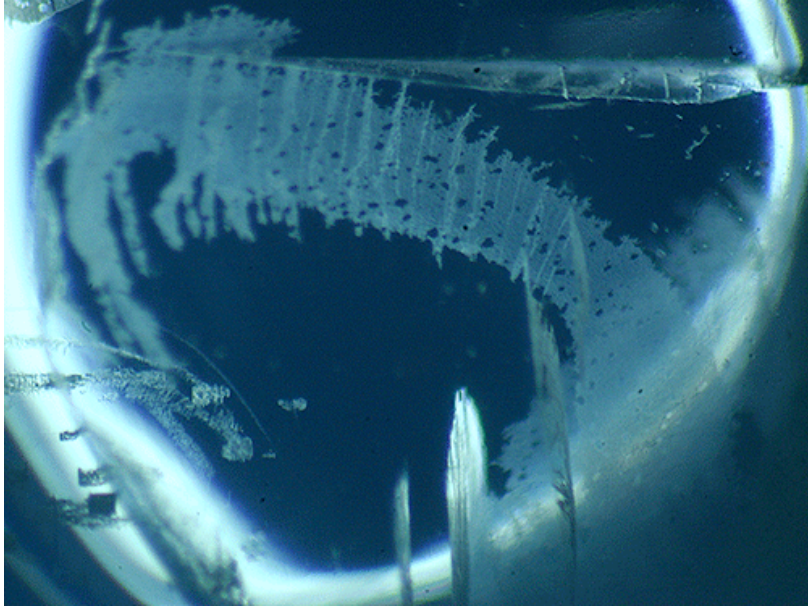
*Figure 32 : cavité de surface remplie de matière organique donnant une couleur brunâtre, QD03, x40, LR*



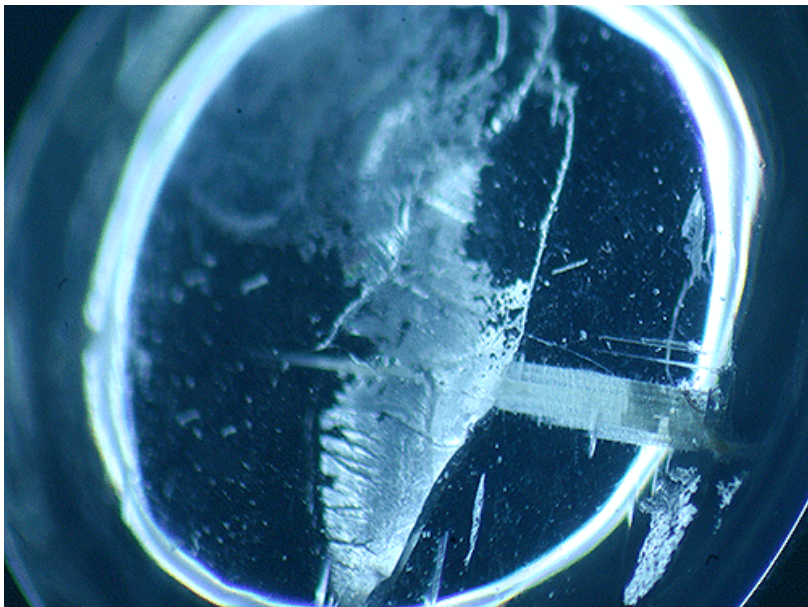
*Figure 33 : microperthite agglomérée de sorte à ressembler à un « flocon de neige », QD04, x40, LT*



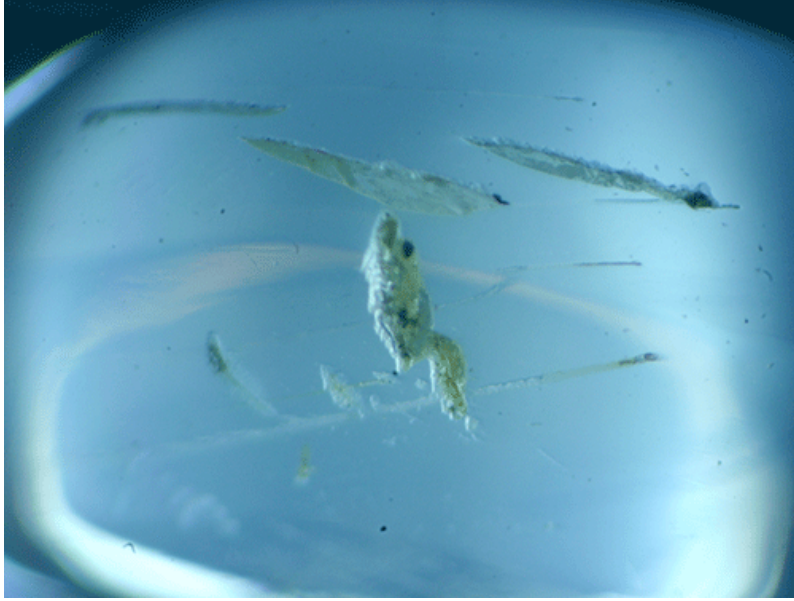
*Figure 34 : fissure de tension et quelques inclusions ressemblant à des cristaux d'albite, QD05, x25, LT*



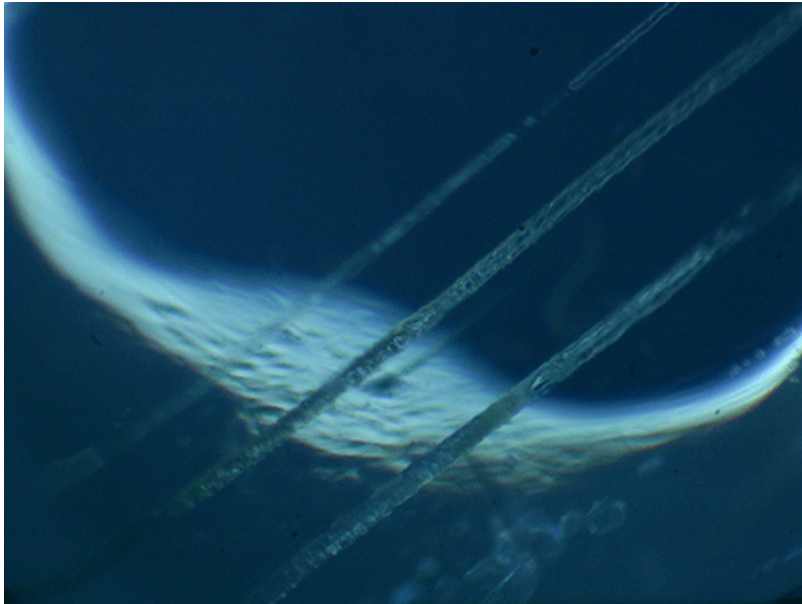
*Figure 35 : voile ondulante et fissures de tension, QD05, x30, LT*



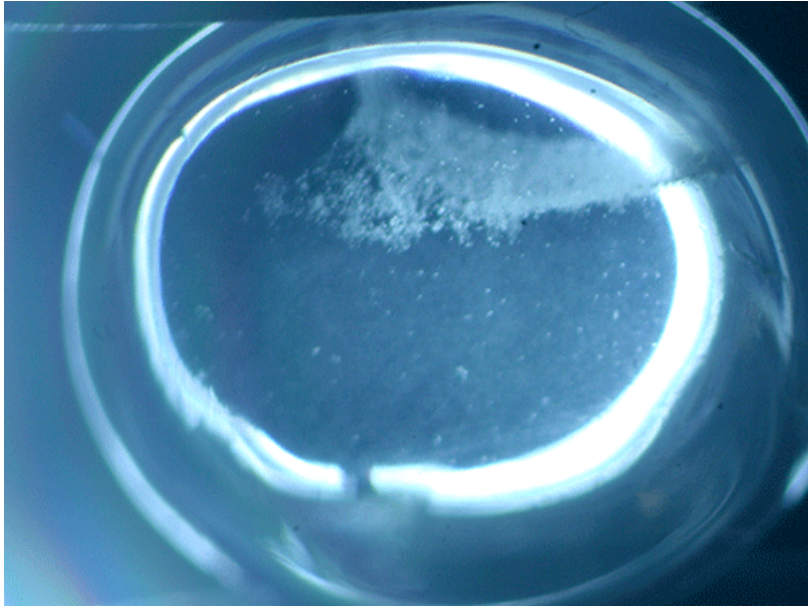
*Figure 36 : fissures de tensions traversant l'échantillon. Nous pouvons remarquer la présence de plusieurs canaux rassemblés en un seul, QF06, x20, LT*



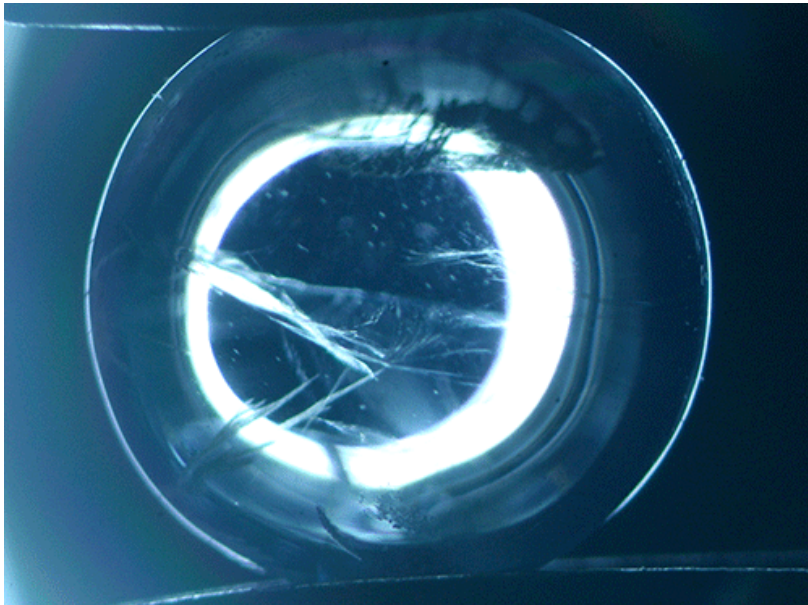
*Figure 37 : cavité et fissures remplies d'impuretés donnant une couleur brunâtre à celles-ci, QD07, x20, LT*



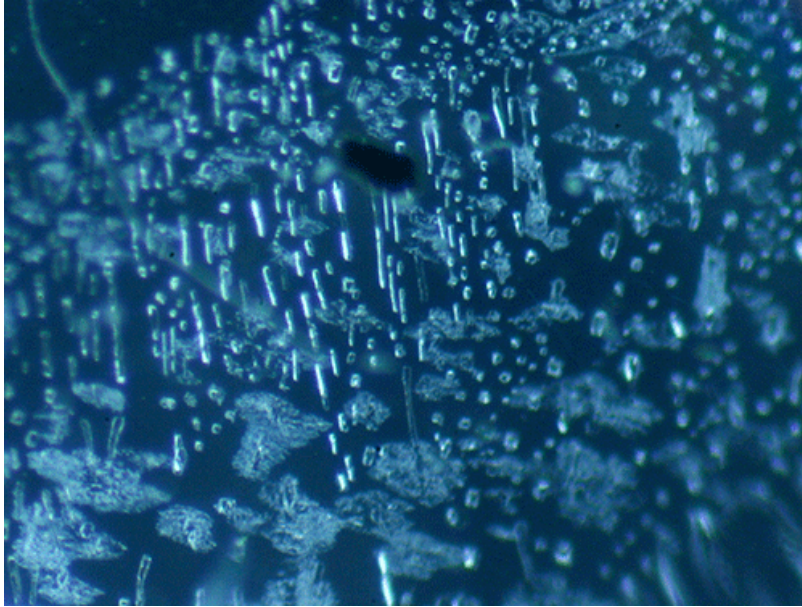
*Figure 38 : canaux vides parallèles, QD07, x25, LT*



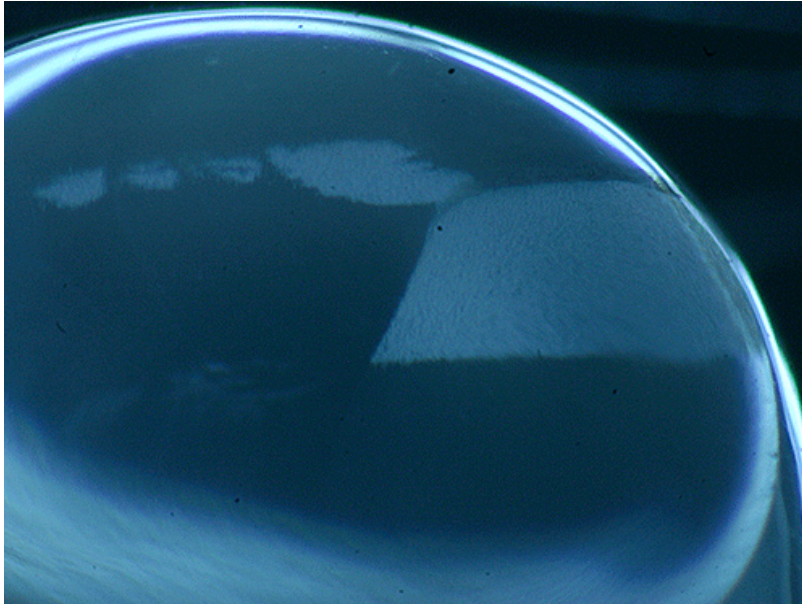
*Figure 39 : givre de guérison,  
QD08, x15, LT*



*Figure 40 : voile ondulant le long  
d'un plan, QD09, x15, LT*

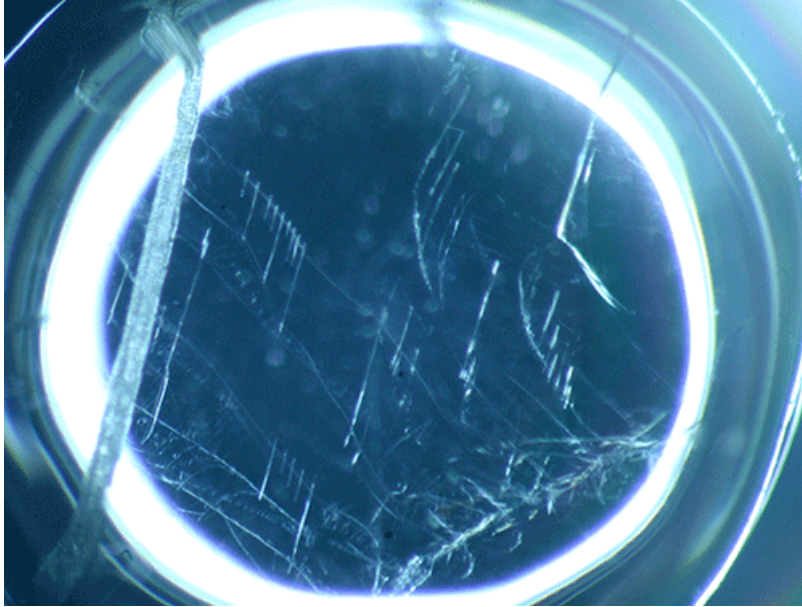


*Figure 41 : microperthites alignées dans un même plan, QD10, x40, LR*

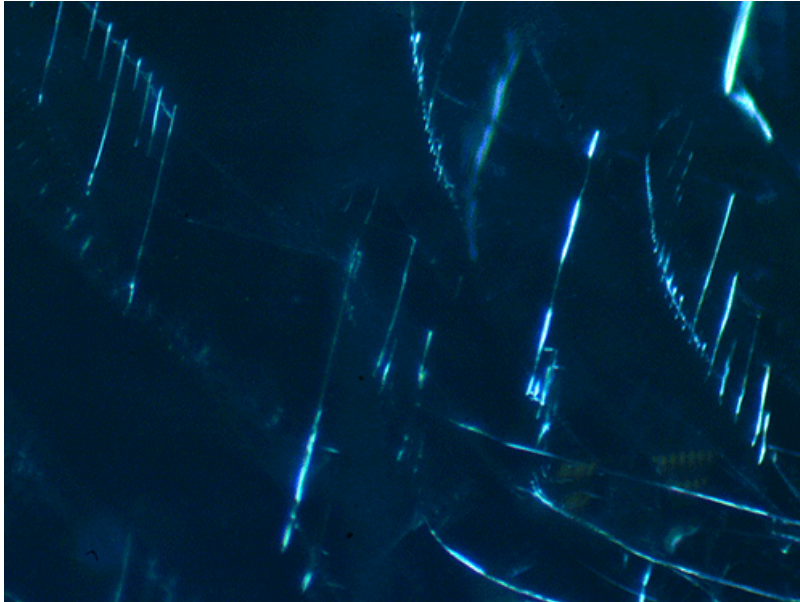


*Figure 42 : voiles blancs réparties le long d'un plan de clivage, QD11, x25, LR*





*Figure 43 : plusieurs fissures de tensions réparties dans différents plans, QD12, x20, LT*



*Figure 44 : agrandissement de la figure précédente, QD12, x40, LT*



*Figure 45 : multitude de canaux donnant cet aspect « bambous », QD17, x25, LT*



*Figure 46 : canal affleurant la surface, QD17, x30, LR*



*Figure 47 : affleurement d'un canal à la surface de l'échantillon, QD17, x20, LR*



*Figure 48 : lamelles d'exsolution ou de dissolution visible à l'intérieur de l'échantillon, QD17, x15, LR*



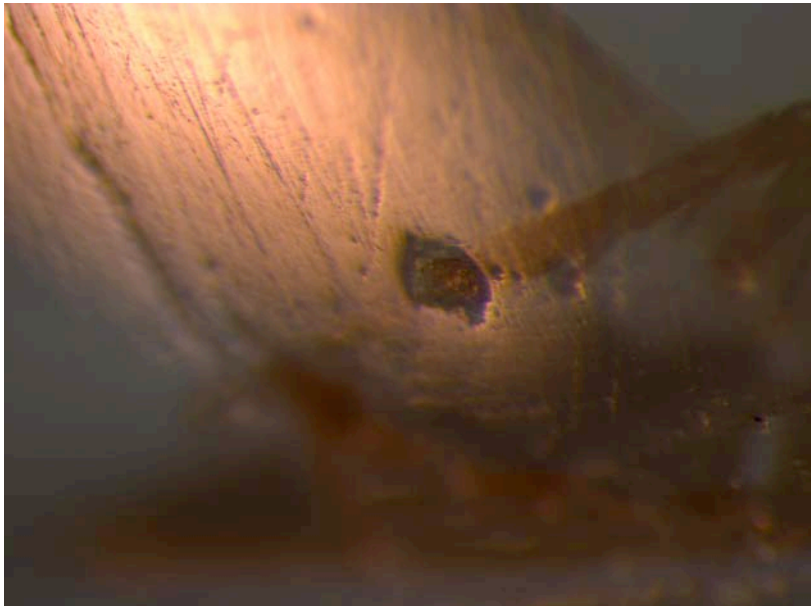
*Figure 49 : réflexion de la lumière sur les lamelles, QD17, x15, LR*



*Figure 50 : affleurement d'un « bambou », QD17, x20, LR*



*Figure 51 : légère iridescence à l'affleurement d'un « bambou », QD17, x40, LR*



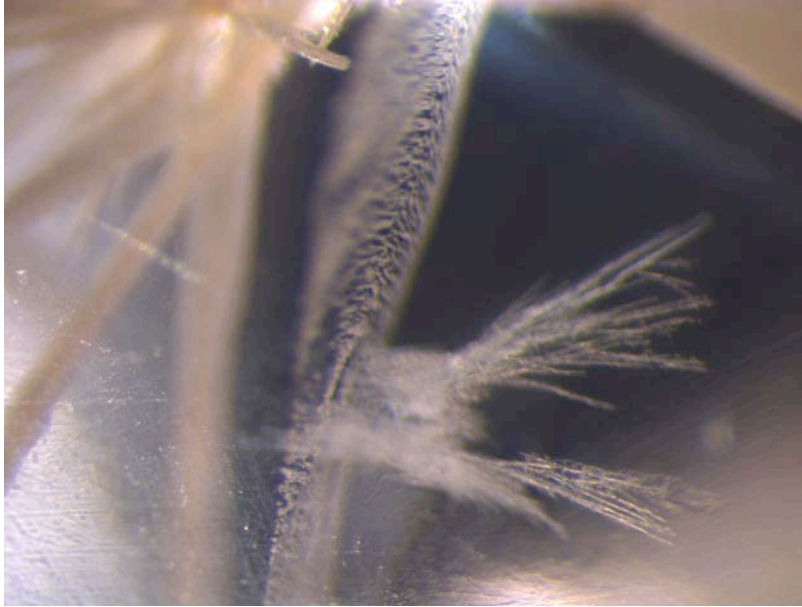
*Figure 52 : affleurement d'un autre « bambou » QD17, x15, LR*



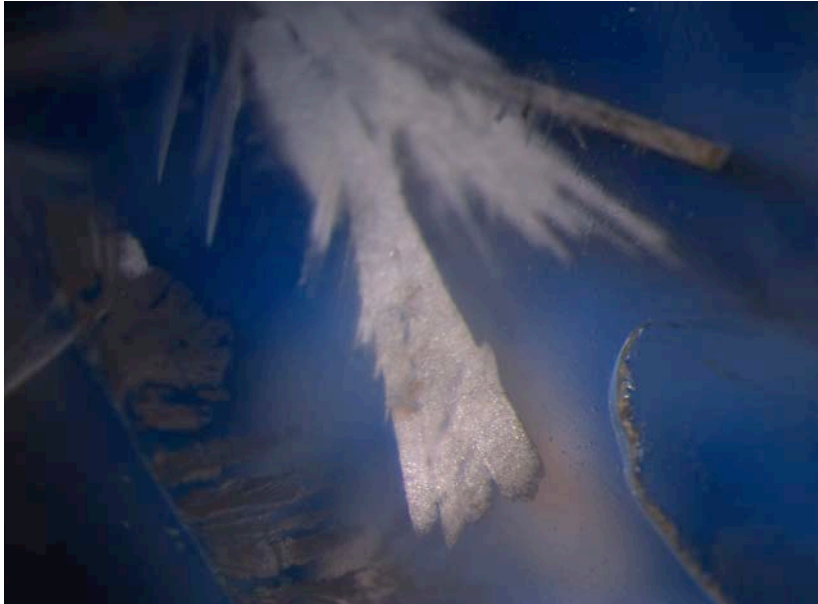
*Figure 53 : inclusions « bambou »  
observées de manière à faire  
ressortir l'adulorescence bleue,  
QD17, x10, LR*



*Figure 54 : iridescence le  
long de fissures affleurantes,  
QD17, x10, LR*



*Figure 55 : léger givre  
affleurant la surface,  
QD17, x40, LR*



*Figure 56 : fissures, voiles et  
« bambou », QD17, x25, LR*



*Figure 57 : givre de guérison, QD17, x40, LR*

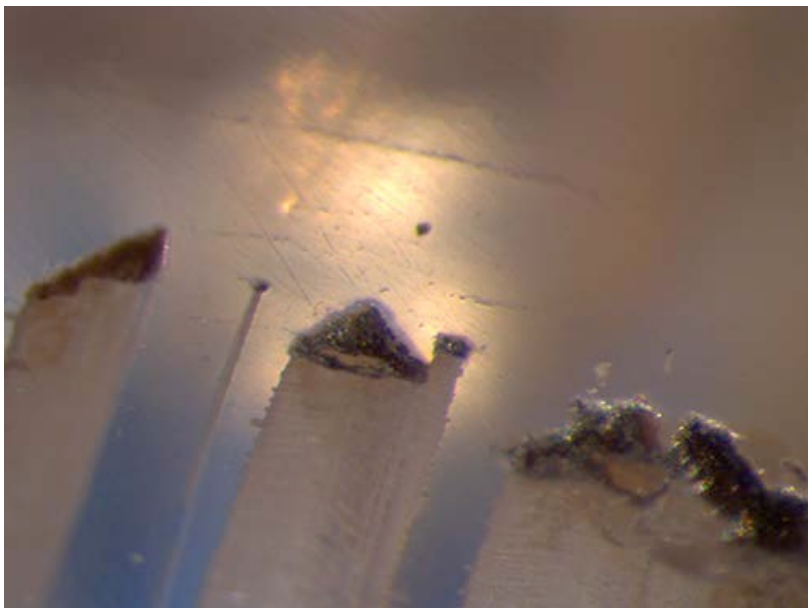


*Figure 58 : fissures et « bamboos » se réunissant en un point central (QD17) x10, LR*





*Figure 59 : « bambous » alignés et affleurant, QD18, x15, LR*



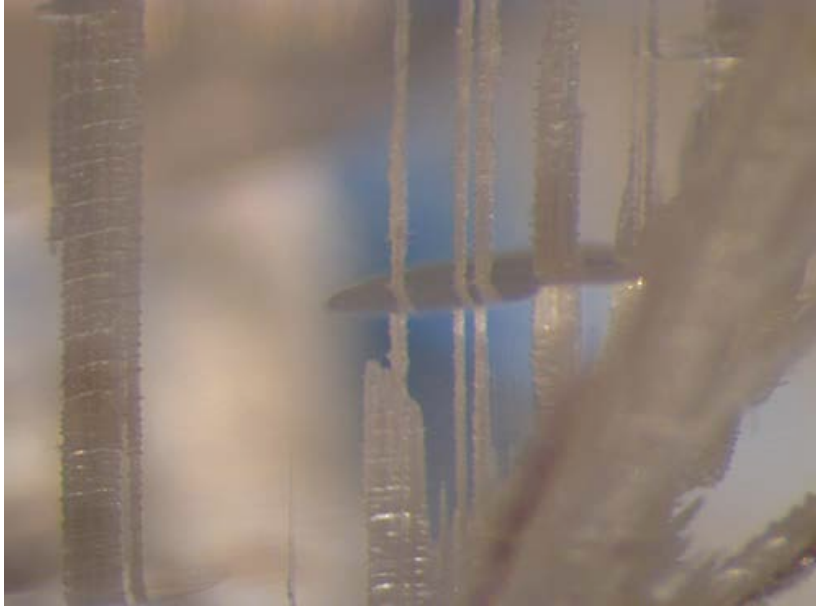
*Figure 60 : affleurement des « bambous », QD18, x35, LR*



*Figure 61 : « bambou » alignés et affleurant, QD18, x15, LR*



*Figure 62 : givre de guérison présent au milieu des « bambous », QD18, x20, LR*



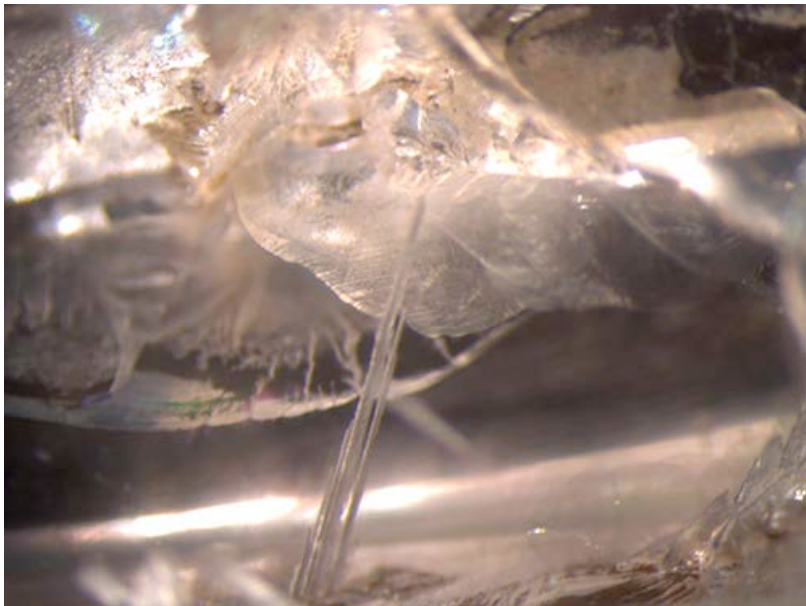
*Figure 63 : canaux séparés en un plan par une fissure, QD18, x40, LR*



*Figure 64 : surface polie montrant des givres ainsi que des voiles, mais aussi quelques canaux, QD19, x15, LR*



*Figure 65 : même photo que la figure 64 mais incliner légèrement afin de faire ressortir l'iridescence présente le long d'une fissure, QD19, x15, LR*



*Figure 66: fissure de tensions et canaux (bambous) affleurant le long de la surface polie. Nous pouvons remarquer une très légère iridescence le long d'une des fissures, QD19, x30, LR*

## 2) LUMINESCENCE AU RAYONNEMENT ULTRA VIOLET

Les trois photographies suivantes sont prises sous des différentes lumières. Une forte luminescence rouge présente dans tous les échantillons est visible aux UV courts (figure 68). Sous les UV longs, la luminescence blanche-bleue est un peu plus irrégulière entre les différentes pierres (figure 69).



Figure 67 : lumière blanche

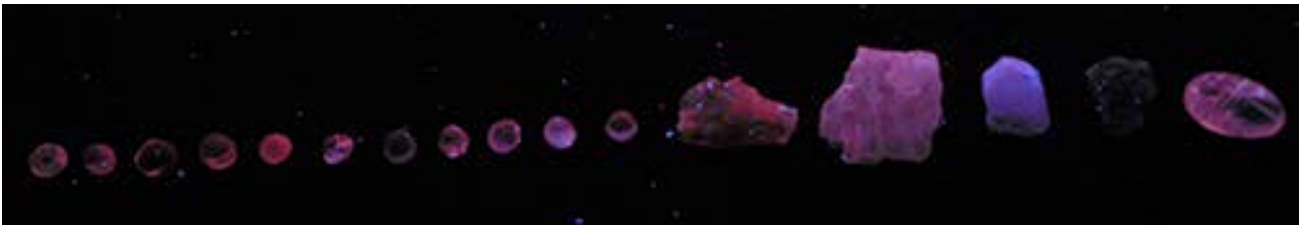


Figure 68 : UV court (254 nm)



Figure 69 : UV long (365nm)

## 3) ANGLE D'EXTINCTION

Pour quelques échantillons nous avons pu également mesurer l'angle d'extinction à partir de {010}. Celui-ci étant généralement faible sur nos mesures (tableau 6), nous pouvons penser que la teneur en feldspath sodique est relativement faible (Spencer, 1930).

	Angle d'extinction à partir de {010}
QD01	4°
QD02	2°
QD05	3°
QD07	4°
QD11	5°
QD12	4°
QD13	0° - 1°

Tableau 6 : Mesure de l'angle d'extinction entre la trace du clivage {001} et {010}

## II) Techniques de laboratoire

### 1) SPECTROMETRIE UV-VIS

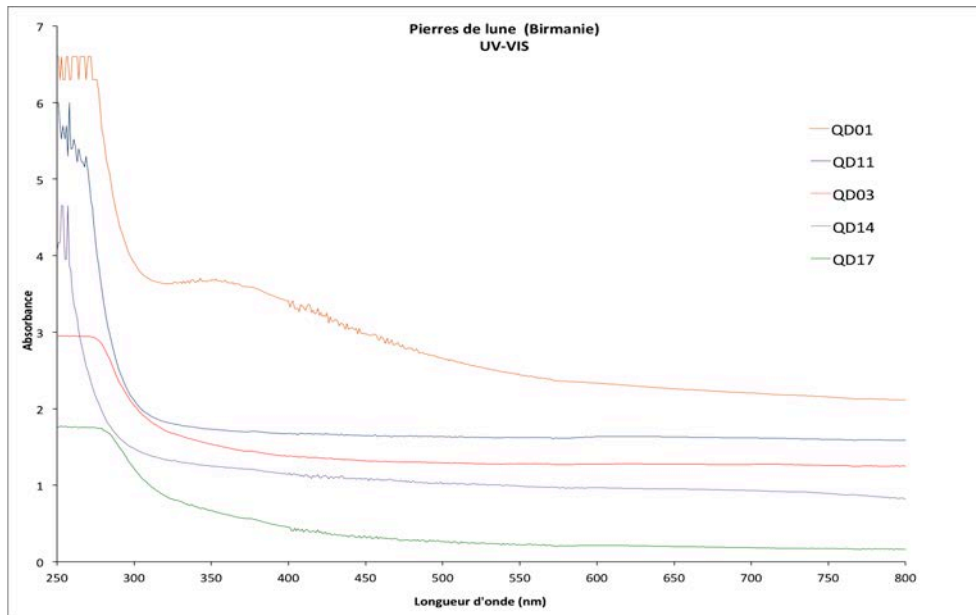


Figure 70 : Spectres UV-VIS des échantillons QD01, QD03, QD11, QD14, QD17.

Une absorption régulière de plus en plus importante du bleu vers le violet est visible sous la forme d'un continuum. Cette absorption est faible car la plupart des échantillons sont incolores. Néanmoins une bande large centrée vers 350 nm se retrouve dans QD01 et, de manière bien moins intense, dans QD14. Cette absorption déborde un peu dans le visible, donnant une faible couleur jaune. Tous les spectres se terminent par une absorption totale dans l'UV lointain en dessous de 280 nm et sont cohérents avec la couleur gris-jaune de nos échantillons observés en transmission.

### 2) SPECTROMETRIE INFRAROUGE

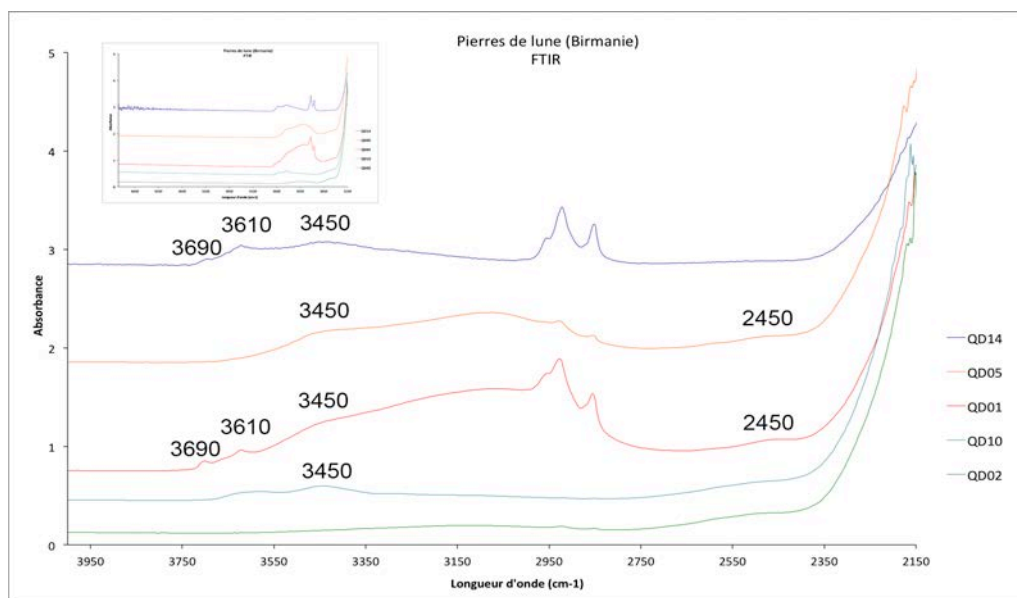


Figure 71 : Spectres en infrarouge des échantillons QD01, QD02, QD05, QD10, QD14.

En infrarouge, on peut observer quelques absorptions à  $3690\text{ cm}^{-1}$  et  $3610\text{ cm}^{-1}$  généralement associées aux OH. Dans la même région, on note une bande large peu intense vers  $3450\text{ cm}^{-1}$  dans la plupart des échantillons, mais pas dans tous (absente dans QD02). Les pics à  $2920\text{ cm}^{-1}$  et  $2850\text{ cm}^{-1}$  sont dus à la présence de graisse de doigts sur les échantillons. Sur certains d'entre eux on observe une large bande très peu intense vers  $2450\text{ cm}^{-1}$ . Puis l'absorption est totale en dessous de  $2150\text{ cm}^{-1}$  ; cette absorption est liée à la charpente silicatée des pierres de lune (comm.pers., Benjamin Rondeau, 2014).

### 3) SPECTROMETRIE RAMAN

#### 3.1) Nature du feldspath :

Avant de commencer à identifier les inclusions, il est nécessaire de caractériser la nature du feldspath. L'analyse en Raman dispersif à Transformée de Fourier nous permettra donc de commencer sur de bonnes bases.

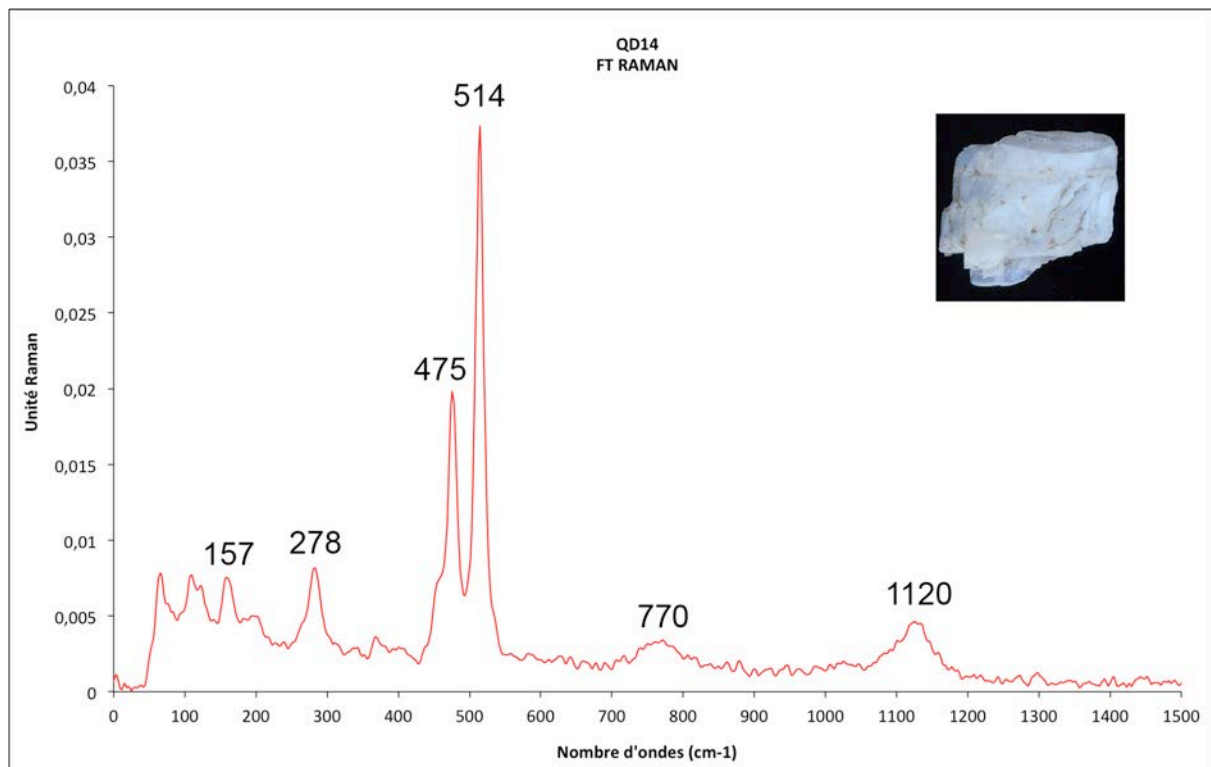


Figure 72 : Spectre FT Raman de QD14.

L'analyse au FT Raman de l'échantillon QD14 montre les principaux pics des feldspaths alcalins à  $157\text{ cm}^{-1}$  et  $514\text{ cm}^{-1}$ , ainsi qu'à  $278$  et  $475\text{ cm}^{-1}$ . Deux pics larges et peu intenses sont présents vers  $770\text{ cm}^{-1}$  et  $1120\text{ cm}^{-1}$  associés également aux feldspaths alcalins (Freeman et al., 2008).

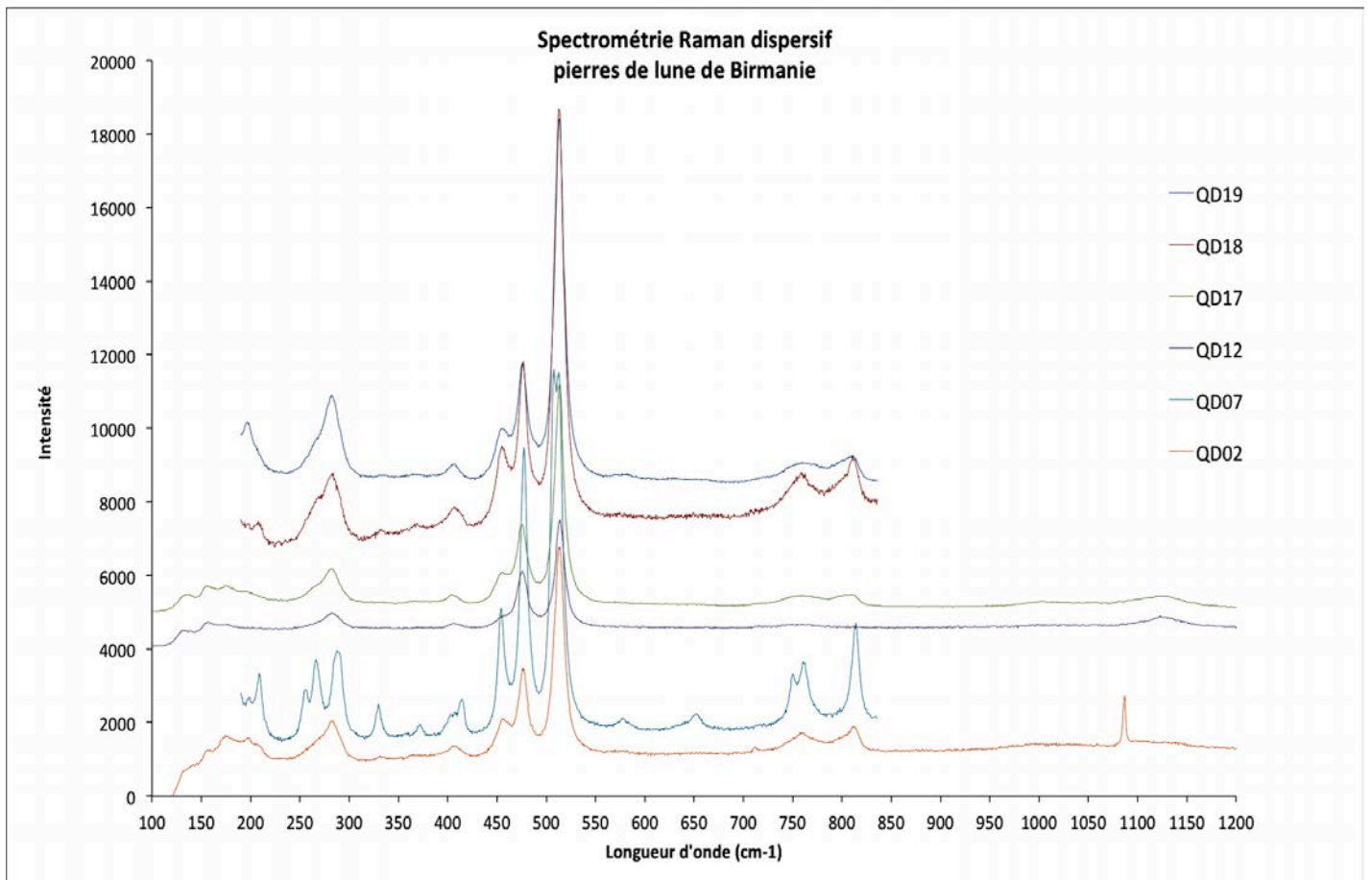


Figure 73 : spectrométrie Raman dispersif des échantillons QD02, QD07, QD12, QD17, QD18, QD19.

	Longueur d'onde (cm-1) des pics majeurs																		
<b>QD19</b>		194			<b>279</b>			400	<b>452</b>	<b>474</b>	<b>512</b>					760	809		
<b>QD18</b>					<b>279</b>			400	<b>453</b>	<b>475</b>	<b>512</b>					760	809		
<b>QD17</b>					<b>278</b>			400		<b>472</b>	<b>513</b>			750		805			1120
<b>QD12</b>	<b>153</b>				<b>279</b>			400		<b>474</b>	<b>513</b>								
<b>QD07</b>			254	264		285	328		412	<b>453</b>	<b>476</b>	<b>512</b>	575	650		750	760	812	
<b>QD02</b>	<b>154</b>				<b>279</b>			400		<b>453</b>	<b>475</b>	<b>512</b>			710	755		809	1086

Tableau 7 : synthèse des pics majeurs présents sur la figure 73 (les valeurs en gras sont les longueurs d'ondes propres aux feldspaths alcalins (Pinet et al., 1992)).

Après avoir pris les mesures perpendiculairement au plan de base des cabochons, nous pouvons remarquer que les pics principaux des feldspaths alcalins sont présents sur tous les échantillons, les pics à 400 cm<sup>-1</sup> sur QD02, QD12, QD17, QD18, QD19 sont également ceux des feldspaths (comm.pers. Jean Yves Mevellec., 2014). A noter également la présence de bandes larges mais peu intenses vers 750 cm<sup>-1</sup> et 810 cm<sup>-1</sup>, sur QD02, QD07, QD17, QD18, QD19 qui sont également caractéristiques des feldspaths alcalins (Freeman et al., 2008).



### 3.2) Nature des inclusions

Après la préparation des échantillons QD17 et QD19, nous avons pu obtenir différentes mesures. Les résultats sont affichés par échantillon, avec la mesure du feldspath superposée à celle de l'inclusion mesurée.

Il est à noter que lors du passage du laser sur une des fissures du bord du cabochon, une fluorescence vive est apparue puis a disparu.



Figure 74 : fluorescence lors du passage du laser sur QD17

L'échantillon QD17 a été passé sur les deux instruments, il en résulte deux mesures assez différentes.

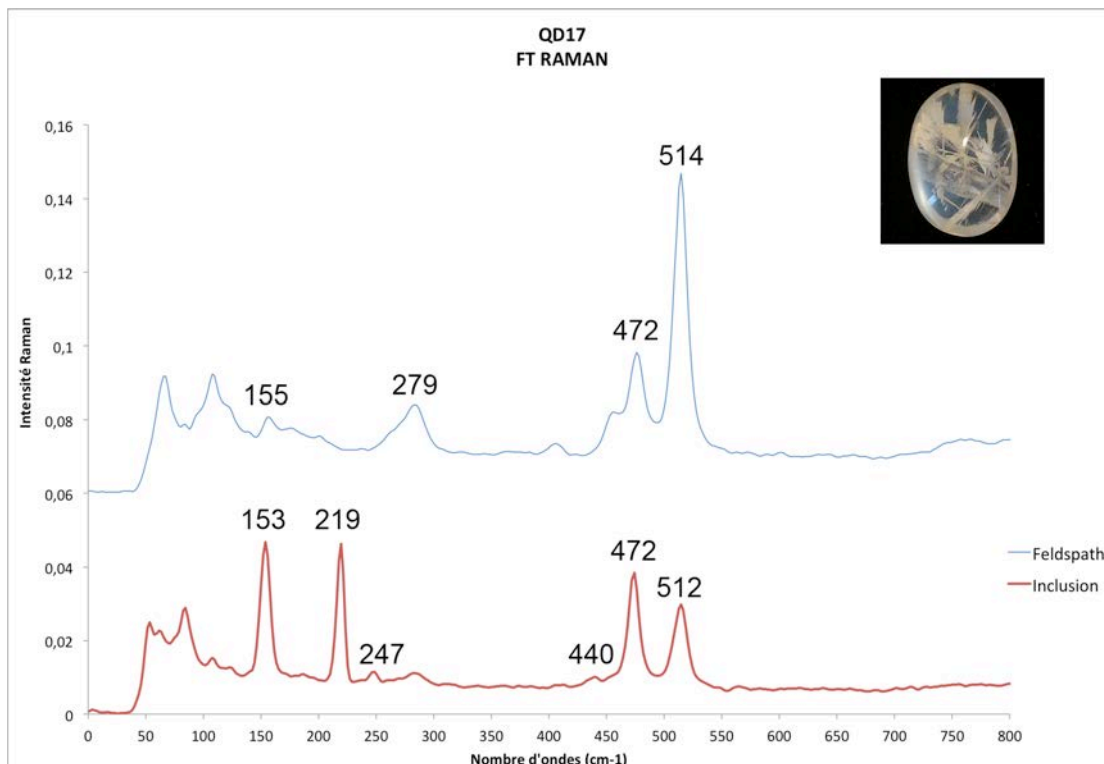


Figure 75 : Spectre FT Raman de QD17 (feldspath et inclusion).

Pics majeurs à 219 et 153  $\text{cm}^{-1}$  ainsi que d'autres pics à 247, 440 et 472  $\text{cm}^{-1}$  ces signaux sont très proches de ceux du soufre (Pinet et al., 1992).

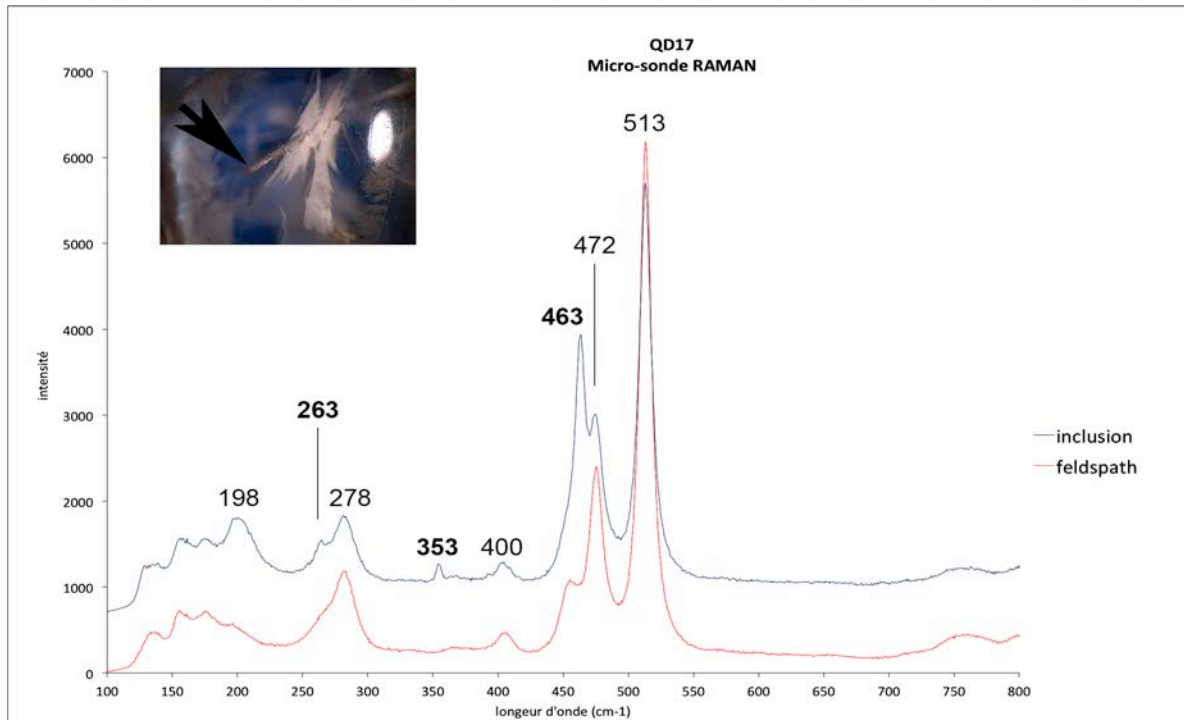


Figure 76 : Spectre Raman dispersif de QD17 (feldspath et inclusion).

Pic des feldspaths alcalins à 513 cm<sup>-1</sup>, 472 cm<sup>-1</sup>, 400 cm<sup>-1</sup> et 278 cm<sup>-1</sup> ; les autres pics 463 cm<sup>-1</sup>, 353 cm<sup>-1</sup>, 263 cm<sup>-1</sup> et 198 cm<sup>-1</sup> uniquement présents dans l'inclusion sont très proches de ceux du quartz alpha (Pinet et al., 1992).

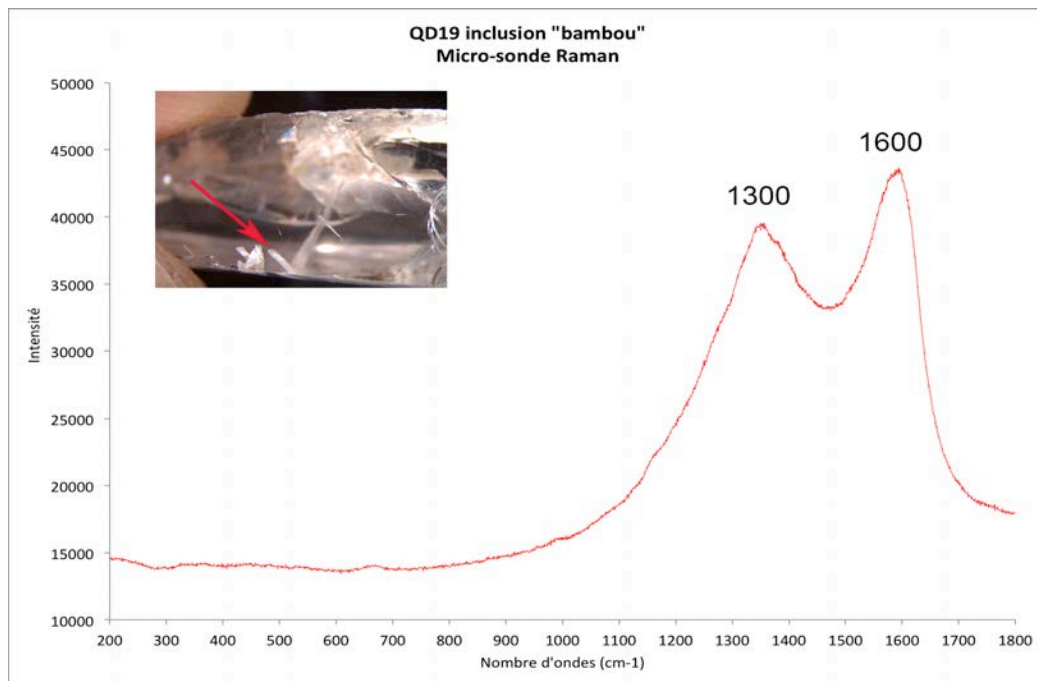


Figure 77 : Spectre Raman dispersif d'une inclusion affleurante de QD19.

Ce spectre laisse apparaître deux bandes larges vers 1300 cm<sup>-1</sup> et 1600 cm<sup>-1</sup>. Ce signal est courant lors de la présence de carbone amorphe (comm.pers. Jean Yves Mevellec., 2014). Il est à noter que beaucoup de mesures ont été corrompues par une très forte luminescence qui, mêler au signal du carbone amorphe peut dissimuler d'autres mesures.

#### 4) MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (MEB)

Le tableau suivant compile les données recueillies lors des mesures quantitatives des éléments présents dans les échantillons QD07, QD10, QD13, QD14 et QD15. Le pourcentage d'albite est mesuré selon le calcul suivant :  $100 \times \text{Na} / (\text{Na} + \text{K})$  (comm.pers. Benjamin Rondeau., 2014).

Elt	QD07		QD10		QD13		QD14		QD15	
	P%	A%	P%	A%	P%	A%	P%	A%	P%	A%
<b>O</b>	40,23	55,80	43.19	61.27	39.01	61.16	42.27	61.37	39,20	56,67
<b>Na</b>	5,02	4,85	2.29	2.26	1.85	2.01	2.28	2.31	0,19	0,19
<b>Al</b>	10,63	8,74	9.20	7.74	8.02	7.46	8.96	7.71	9,69	8,30
<b>Si</b>	34,01	26,87	28.09	22.70	25.59	22.86	27.69	22.90	31,81	26,20
<b>Cl</b>			0.35	0.22						
<b>K</b>	6,58	3,74	10.00	5.81	10.14	6.51	9.62	5.71	14,61	8,64
	96,47	100.00	93.12	100.00	84.61	100.00	90.82	100.00	95,50	100.00
<b>% d'albite</b>		56,46		28,00		23,59		28,80		2,15

Tableau 8 : résultats quantitatifs (P% = pourcentage poids, A% = pourcentage atomique).

Tous les résultats des analyses (tableau 8) sont compatibles avec les feldspaths alcalins. Le pourcentage atomique est variable en fonction des éléments présents dans les pierres. Cependant QD07 et QD15 se trouvent très différents dans leur teneur en sodium. QD15 serait même proche de l'orthose pur avec un pourcentage d'albite très faible. Pour les autres, il en va de la moitié d'orthose (QD07) aux deux tiers (QD10, QD13, QD14).

Les deux photographies suivantes proviennent de deux cristaux bruts différents, les lames de clivages sont bien visibles et il n'y a pas d'inclusion notable à cette échelle.

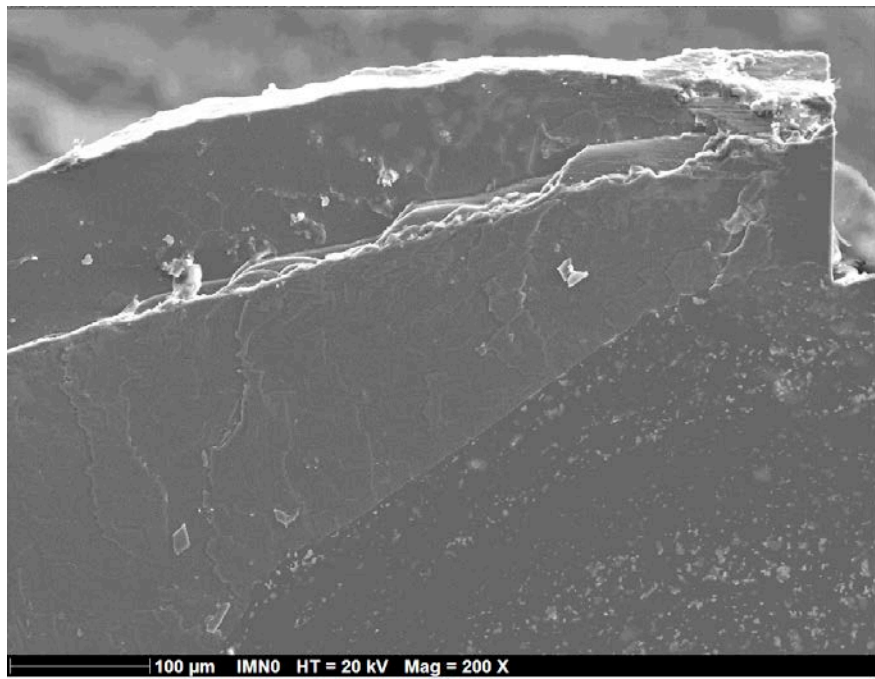


Figure 78 : photographie au MEB du clivage sur {001} (QD14)

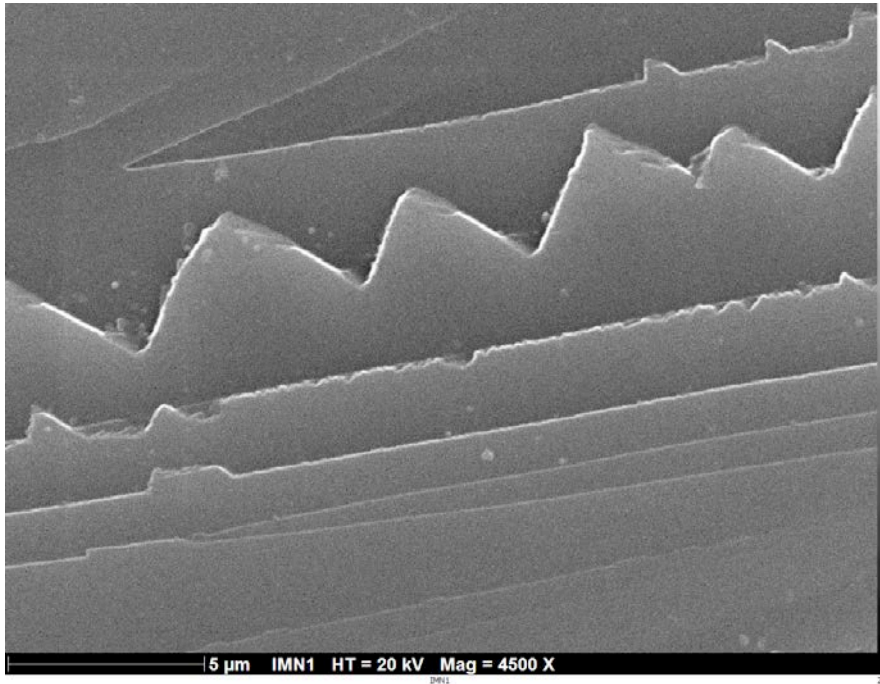


Figure 79 : photographie au MEB du clivage sur {001} (QD15)

Les échantillons QD17, QD18 et QD19 n'ont malheureusement pas pu être soumis à la quantification des éléments par manque de temps et d'accessibilité au MEB. Par contre nous avons pu observer l'affleurement de ces inclusions « bambou » ressortant sur la photographie comme des canaux voire des trous.

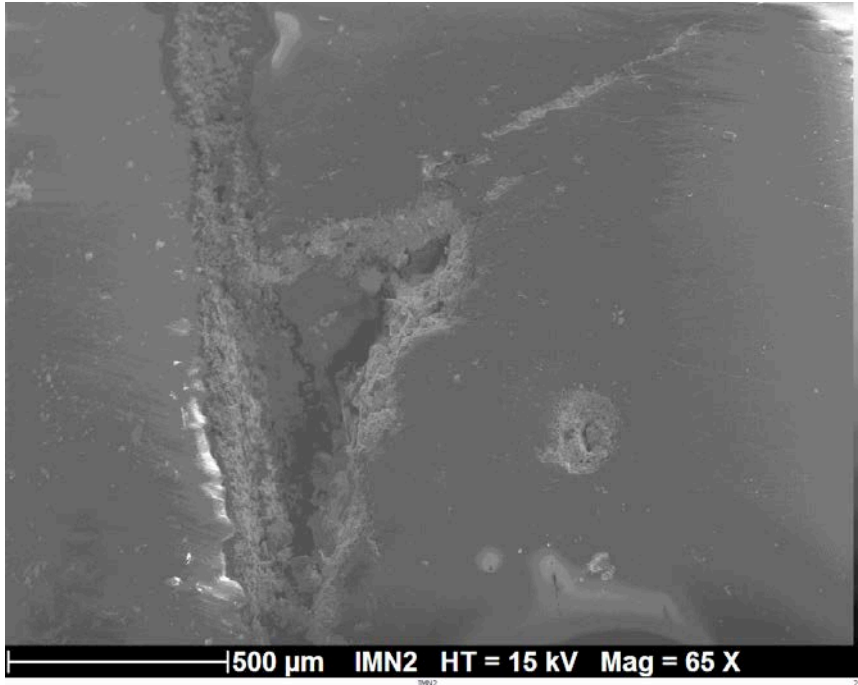


Figure 80 : canaux affleurant la surface de QD18

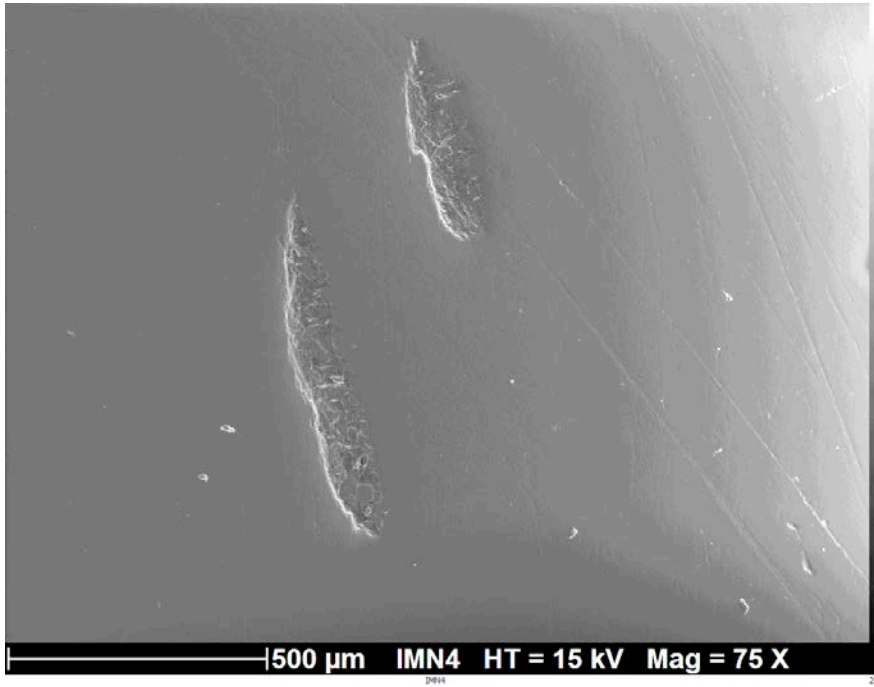


Figure 81 : canaux affleurant la surface de QD19

## DISCUSSION

La gemmologie classique, le Raman et la microanalyse EDS peuvent nous permettre d'affirmer qu'il s'agit bien de pierres de lune. L'analyse chimique, plus précise, nous a permis de confirmer les résultats obtenus avec la spectrométrie Raman : les feldspaths étudiés font partie de la série des alcalins par la présence de Na et de K et l'absence de Ca (tableau 8).

Les mesures prises pour l'angle d'extinction à partir de {010} (tableau 6) étant comprises entre 0° et 5°, nous pouvons en déduire que le pourcentage en feldspath sodique est faible (< 8 %); ce qui correspondrait avec l'étude de Spencer. Cependant, l'échantillon QD07 montre un angle d'extinction faible (5°) et une forte teneur en Na (Na/K = 56,46 A%). La mesure chimique reste ponctuelle. Nous n'avons pu conclure si il s'agit d'une erreur de mesure dans la chimie ? Dans l'angle ? Une hétérogénéité chimique locale comme des lamelles d'exsolution ?

Mis à part les inclusions « bambous » de QD17, QD18, QD19, nous ne pouvons faire ressortir de critères permettant de séparer ces pierres de lune d'autres échantillons de provenances différentes (Sri Lanka, Madagascar). La chimie et le signal Raman sont ceux d'un feldspath alcalin classique, la luminescence est la même (Genot L., 1998). Sous les UVC, la présence du Fe<sup>3+</sup> (Robbins., 1994) donne aux pierres une luminescence rouge (figure 69). Au UVL, la luminescence bleuâtre-blanche (figure 69), serait la cause de défauts de structure Al - O<sup>-</sup> et Si - O<sup>-</sup> (Barnett et al., 1997).

Les spectres UV-VIS (figure 70) sont caractéristiques des pierres incolores montrant une diffusion bleutée, par la présence d'un continuum augmentant du rouge au violet. Même si de rares bandes sont présentes en plus vers 350 nm (QD01, QD14), elles affectent peu la couleur et ne sont pas spécifiques à la Birmanie et seraient probablement liées à la présence du Fe<sup>3+</sup> (Genot L., 1998). Cependant il est à noter une légère transmission entre 400 nm et 500 nm pour les pierres ayant une adulescence plus prononcée (QD01 et QD17).

Les résultats obtenus en infrarouge montrent une très légères absorptions à 3690 cm<sup>-1</sup> et 3610 cm<sup>-1</sup>, généralement associées aux OH, avec une bande large peu intense vers 3450 cm<sup>-1</sup> (figure 71) non décrites sur les spectres de référence (figure 19 et 20). Il est à noter que ce signal est très proche de celui de la kaolinite (qui est également un produit d'altération). Alors que les spectres de référence montrent des absorptions vers 900 cm<sup>-1</sup>, 700 cm<sup>-1</sup> et 500 cm<sup>-1</sup>, les échantillons de ce rapport révèlent une absorption totale à partir de 2150 cm<sup>-1</sup> (figure 71).

Le FT Raman et la microsonde Raman montrent les signaux typiques des feldspaths alcalins (figures 72 et 73). Lors de l'analyse des inclusions « bambou » nous avons pu observer quelques signaux. Malgré une forte luminescence (figure 74) rendant les mesures difficiles sur QD17, un signal ressemblant fortement à celui du soufre est apparu (figure 75); ainsi que celui du quartz alpha (figure 76) plutôt habituel pour une gemme venant d'une pegmatite. Sur QD19 le spectre du carbone amorphe est apparu (figure 77). L'étude des échantillons QD17 à QD19 de manière plus approfondie permettrait de mieux renseigner voire de confirmer la nature de ces inclusions qui sembleraient être des canaux vides tapissés de carbone amorphe avec quelques impuretés organiques (d'ou la luminescence) mêlées à d'autres éléments.

## CONCLUSION & PERSPECTIVES

Les différentes mesures prises en spectrométrie Raman et au microscope à balayage électronique confirment la nature de ces feldspaths. Cependant, ce que nous pouvons faire ressortir de ce rapport est la présence de ces inclusions « bambous » qui semblerait être des figures de dissolution laissant apparaître ces canaux vides avec divers éléments dedans. Cet intrigant mélange serait-il dû à des restes liés aux conditions de genèse de ces pierres ? Comme des cristaux d'anhydrite (figure 82 et 83) qui ont été dissous ce qui pourrait expliquer la présence de soufre. Laissant ainsi apparaître ces inclusions qui jusqu'à ce jour n'ont jamais été décrites sur des pierres de gisements différents.



*Figure 82 : Cristaux tabulaires d'anhydrite.*



*Figure 83 : Cristal d'anhydrite.*

Mise à part ces inclusions « bambous », rien ne permet de séparer les pierres de lune de Birmanie de différentes provenances. Ce qui n'enlève en rien à leur éclat ou à leur beauté par rapport à ces autres pierres. La comparaison de certaines mesures comme les spectres UV-VIS serait envisageable sous réserve de documentation en fonction de l'origine des pierres. Des études plus approfondies telles que la mesure de l'angle 2V ou la diffraction des rayons X permettrait de confirmer si il s'agit, de sanidine, d'orthose BT-HT ou d'anorthose. Pour aller plus loin dans la caractérisation de l'effet pierre de lune, le microscope électronique à transmission (MET) serait utile pour la mesure et l'analyse des microstructures ce qui permettrait de mettre en valeur le rôle de celles ci dans la coloration de la pierre (Genot L., 1998). Aux vues de la multitude de gisements de pierres de lune sur le territoire birman (comm.pers., Emmanuel Fritsh, 2014) une étude de terrain serait utile pour mieux renseigner la géologie de ces pierres de lune.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Barnett S. M., Bailiff I. K., (1997), The temperature dependence of luminescence in some feldspars (80-300K), *Journal of Physics D: Applied Physics* 30, p. 683-89.
- Cesbron F., Lebrun F., Le Cleach'h J.M., Deville J. (2007) *Feldspaths. Minéraux & Fossiles*, hors série (25), p. 96.
- Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., (1992), *An Introduction To The Rock-Forming Minerals*. 2<sup>ème</sup> édition, Longman Scientific & Technical, UK, p411.
- Franke W., Ghobarkar H. (1982) The morphology of hydrothermally grown K-feldspar. *Neues Jahrb., Min., Monat.*,p. 57-68.
- Freeman J.J., Wang A., Kuebler K.E., Jollif B.L., Haskin L.A (2008) Characterization of natural feldspars by Raman spectroscopy for future planetary exploration. *The Canadian Mineralogist*, Vol. 46, No. 6, pp. 1477-1500.
- Genot L. (1998) *Les pierres de lune bleues de Meethiyagoda Sri Lanka*. Mémoire de diplôme universitaire de gemmologie. Université de Nantes, France.
- Gübelin E. J., Koivula J. I., (1986), *Photoatlas of Inclusions in Gemstones*. 3<sup>ème</sup> édition, ABC Edition, Zürich, Suisse.
- Pinet M., C.Smith D., Lasnier B. (1992) *La microsonde Raman en gemmologie*. Association française de gemmologie, hors serie, p.60.
- Raman C.V., Jayaraman A., Srinivasan T.K. (1950) The structure and optical behaviour of the Ceylon moonstones . *Raman Research Institute, Bangalore*, p127-128.
- Robbins M., (1994), *Fluorescence gems and minerals under ultraviolet light*, Geoscience press, Phoenix, Arizona.
- Spencer E. (1930) A Contribution to the study of the moonstone from Ceylan and other areas and of the stability-relation of the alkali-feldspaths., *The Mineralogical Magazine and journal of the Mineralogical society*, N°130, vol XXII, p. 342-343.
- Subagyo Pramumijoyo I.R., Kyaw L.Z., Kyaw Z.L. (2010) *Report On Regional Geology of Myanmar*. Gadjah Mada University, Myanmar, 20 pages.
- Tuttle O. F., (1952) Optical studies on Alkali Feldspars. *Amer. J. Sci., Bowen Vol.*, 553-568.
- White W. B., Matsumura M., Linnehan D. G., Furukawa T., Chandrasekhar B. K., (1986), Absorption and luminescence of Fe<sup>3+</sup> in single crystal orthoclase, *American Mineralogist*, vol 71, p. 1415-19.



- Woensdregt C.F. (1983) Structural morphology of high sanidine ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ). Z. Krist., p239-255.

# ANNEXES

Comparaison de pierres de lunes provenant de différents gisements et compléments au chapitre Etat des connaissances.

En 1930 Mr Edmondson Spencer étudia plusieurs échantillons de pierres de lune de diverses origines dont quatre spécimens provenant de Birmanie.

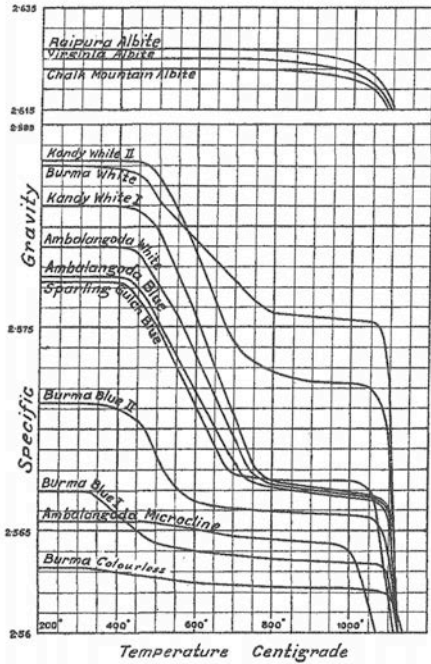


Fig. 7. Specific gravity changes by heating in alkali-felspars.

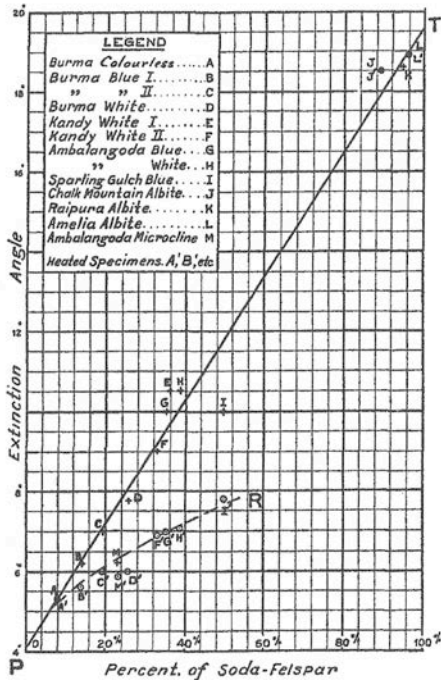


Fig. 4. Extinction on (010) and composition of alkali-felspars.

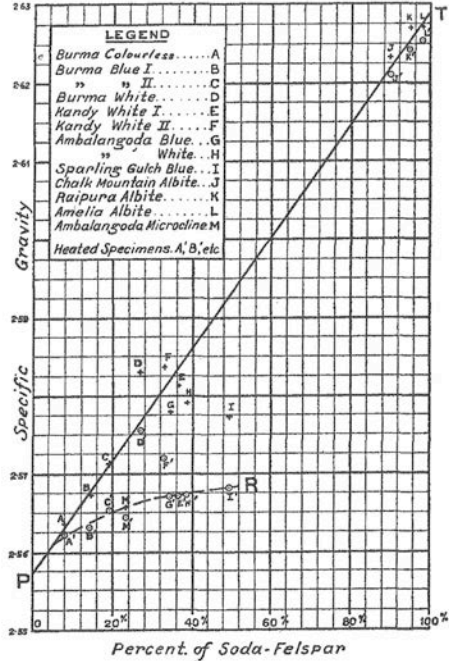


Fig. 5. Specific gravity and composition of alkali-felspars.

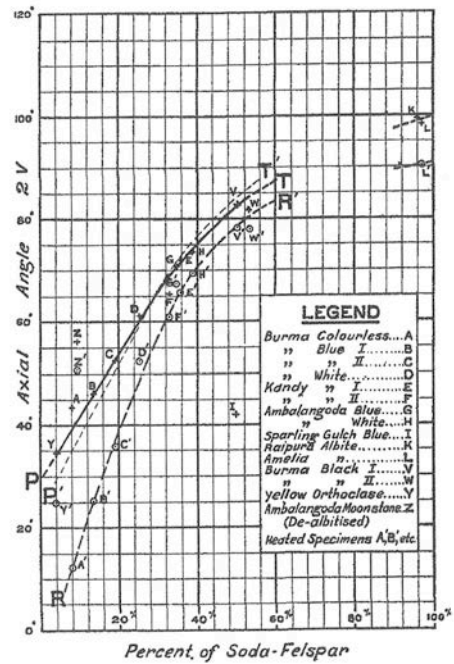


Fig. 6. Optic axial angle and composition of alkali-felspars.