ANNÉE 2011

DIPLÔME D'UNIVERSITÉ DE GEMMOLOGIE

présenté devant l'Université de Nantes U.F.R. des Sciences et des Techniques Par Mme Catherine DEYMIER

UNE NOUVELLE ROCHE GEMME DE BIRMANIE : LA « DEYMIERITE »



soutenu publiquement le 7 juin 2011 au Département des Sciences de la Terre et de l'Univers devent le commission d'avance composée de l

devant la commission d'examen composée de :

| M. E. FRITSCH | Professeur | Président |
|-----------------|-----------------------|----------------|
| M. B. RONDEAU | Maître de Conférences | Vice-président |
| M. H. GARCIA-GU | ILLERMINET | Examinateur |
| | Directeur, GemParis | |
| M. F. NOTARI | Directeur, Gemtechlab | Examinateur |
| M. C. EWELS | Chargé de Recherches | Examinateur |
| M. C. MONNIER | Maître de Conférences | Examinateur |
| M. B. LASNIER | Professeur émérite | Invité |

 \ll Les hommes s'accordent dans le langage qu'ils emploient. Ce n'est pas une conformité d'opinion, mais de forme de vie. »

L. Wittgenstein *Recherches philosophiques* (1953), trad. F. Dastur et al, Gallimard, 2004, II-xi, §83.

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au Professeur Emmanuel Fritsch et au Docteur Benjamin Rondeau qui m'ont prodigué de judicieux conseils tout au long de ce parcours d'« apprenti-chercheur ». Leur indéfectible soutien m'a donné la force d'aller jusqu'au bout de ce travail, qui n'existerait pas sans leurs regards aiguisés et constructifs.

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à mes collègues et amis de la promotion 2010 du Diplôme d'Université de Gemmologie de Nantes et en particulier à Olivier Segura.

TABLE DES MATIÈRES

| REMERCIEMENTS | 3 |
|--|---|
| TABLE DES MATIÈRES | 4 |
| 1. INTRODUCTION | 6 |
| 1.1. Premiers contacts | 6 |
| 1.2. Informations supplémentaires | 7 |
| 2. ETAT DES CONNAISSANCES | 8 |
| 2.1. Classification des roches | 8 |
| 2.2. Classification des minéraux | 11 |
| 2.3. Chaung-gyi, dans la zone minière de Mogôk | 13 |
| 2.4. Géologie de la région de Mogôk | 16 |
| 2.5. Géologie de Chaung-gyi | 20 |
| 3. MATERIAUX ET METHODES | 21 |
| 3.1. Description des échantillons | 21 |
| 3.2. Méthodes utilisées 3.2.1. Lames minces au microscope pétrographique polarisant 3.2.2. Microscope Electronique à Balayage (MEB) 3.2.3. Spectrométrie Raman | 26 26 27 29 |
| 4. RESULTATS | 30 |
| 4.1. Gemmologie classique 4.1.1. Indice de réfraction 4.1.2. Densité 4.1.3. Luminescence 4.1.4. Chelsea 4.1.5. Dureté, ténacité | 30 30 30 30 30 32 32 |
| 4.2. Lames minces 4.2.1 Lame mince au microscope pétrographique polarisant 4.2.1.1. Point 1 ; lame mince 1 provenant de l'échantillon CD9 4.2.1.2. Point 2 ; lame mince 1 provenant de l'échantillon CD9 4.2.1.3. Point 3 ; lame mince 1 provenant de l'échantillon CD9 4.2.2. Résultats de la spectrométrie Raman 4.2.2.1. Etude Raman du point 1 4.2.2.2. Etude Raman du point 2 4.2.3. Résultats du MEB 4.2.3.1. Point 1 ; Lame mince 1 provenant de l'échantillon CD9 4.2.3.2. Point 2 ; Lame mince 1 provenant de l'échantillon CD9 4.2.3.3. Point 3 ; Lame mince 1 provenant de l'échantillon CD9 4.2.4. Tableau comparatif des régulate | 33 33 33 35 37 39 39 42 45 50 50 50 50 |

| 4.3. Lien entre composition chimique et couleur de l'échantillon | 63 |
|--|----------|
| 4.3.1. Echantillon CD1 point 1 | 63 |
| 4.3.2. Echantillon CD1 point 2 | 67 |
| 4.3.3. Echantillon CD1 point 3 | 70 |
| 4.3.4. Echantillon CD1 point 4 | 72 |
| 4.3.5. Echantilion CD1 point 5 | /4 |
| 4.3.7 Echantillon CD1 point 7 | 70 79 |
| 4.3.8. Récapitulatif des résultats du MEB | 81 |
| 5. DISCUSSION | 82 |
| 5.1. Assemblage minéralogique de la devmierite | 82 |
| 5.1.1. Calcite CaCO ₃ | 82 |
| 5.1.2. Sodalite $Na_8Al_6Si_6O_{24}Cl_2$ ou $Na_4Al_3(SiO_4)_3Cl$ | 82 |
| Haüyne $(Na,Ca)_{4-8}[Al_6Si_6(O,S)_{24}](SO_4,Cl)_{1-2}$ | 82 |
| 5.1.3. Edénite NaCa ₂ Mg ₅ Si ₇ AlO ₂₂ (OH) ₂ | 83 |
| Pargasite Na $Ca_2(Mg,Fe^-)_4AI(SI_6AI_2)O_{22}(OH)_2$. | 83 |
| 5.1.4. Diopside Calvigsi $_{2}O_{6}$ 5.1.5. Nénhéline (Na K) Al SiO | 83 84 |
| 5.1.6. Sphalérite (Zn,Fe)S | 84 |
| 5.1.7. Apatite $Ca_5(PO_4)_3$ | 84 |
| 5.1.7. Origine de la couleur | 85 |
| 5.1.8 Récapitulatif des minéraux en présence | 85 |
| 5.2. Pétrologie de la deymierite | 86 |
| 5.3. Peut-on affirmer que notre roche est originaire de Chaung-gyi ? | 86 |
| 5.4. Peut-on affirmer que notre roche est une nouvelle roche gemme ? | 86 |
| 6. CONCLUSION | 87 |
| ANNEXES | 88 |
| Annexe 1- Spectre Raman RRUFF Edénite R050415 | 88 |
| Annexe 2- Spectre Raman RRUFF Haüyne X060005 | 88 |
| Annexe 3-Spectre Raman RRUFF diopside X050059 | 88 |
| Annexe 4- Spectre Raman RRUFF néphéline R040025-3 | 89 |
| Annexe 5- Spectre Raman RRUFF sodalite R060354 | 89 |
| Annexe 6- Spectre Raman RRUFF calcite R04170 | 89 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 90 |

1. INTRODUCTION

Lors du choix des mémoires pour l'obtention du Diplôme d'Université de Gemmologie (DUG) de la faculté des Sciences et des Techniques de Nantes de jolis échantillons d'une roche inconnue que j'avais achetés quelques mois auparavant à Yangon me sont venus à l'idée. Pourquoi ne pas en rechercher la composition ? Le Professeur Emmanuel Fritsch et le Docteur Benjamin Rondeau ont été tout de suite d'accord et ont proposé le titre humoristique : La deymierite de Birmanie ! Ce qualificatif a aussi le mérite de la brièveté, évitant de longues périphrases pour décrire un matériau jusqu'alors sans nom.

1.1. Premiers contacts

Les échantillons de roche que nous nous proposons d'étudier ont été achetés à Yangon à Myanmar (Birmanie) au marché de Bogyoke (Figure 2) dans le cadre d'un voyage de terrain organisé par l'Asian Institute of Gemological Sciences¹ (AIGS) du 13 au 15 mars 2009 pour les étudiants préparant le diplôme de gemmologue (A.G.) (figure 1). Nous accompagnaient monsieur Henry Ho Président et le docteur Laurent Massi Directeur du laboratoire.



Figure 1 : Les étudiants préparant le diplôme de Gemmologue Accrédité (A.G.) à l'AIGS de Bangkok en voyage de terrain à Myanmar



Figure 2 : Le marché de Bogyoke, Yangon, Myanmar

¹ http://www.aigsthailand.com/Default.aspx



Figure 3 : L'examen de la roche inconnue au marché de Bogyoke

Personne n'a pu identifier les échantillons de roche qui nous étaient proposés. Le docteur Laurent Massi a suggéré une roche de la famille de la sodalite. J'ai donc acheté huit échantillons (Figure 3 et 4) de cette roche mystérieuse et attrayante par ses couleurs variées pensant les faire monter en pendentif.



Figure 4 : Les huit échantillons de la roche inconnue

1.2. Informations supplémentaires

Courant décembre 2009 Olivier Segura, un étudiant préparant le DUG, a fait un voyage en Birmanie et a rapporté à ma demande d'autres échantillons de la deymierite que l'on appelle làbas m'a-t-il dit « green sodalite ». Il a par ailleurs réussi à obtenir le nom de la mine de laquelle notre roche est extraite : Chaung-gyi, dans la zone de Mogôk.

La nature détaillée de cette roche ornementale reste toutefois un mystère. C'est ce qui a motivé le travail qui suit.

2. ETAT DES CONNAISSANCES

La <u>pétrographie</u> (du grec *petra*, pierre, et *graphê*, description) est la <u>science</u> de la description et de l'analyse des roches, alors que la <u>pétrologie</u> (du grec *petra* et *logo*, étude) est la science qui étudie les mécanismes de formation et de transformation des roches.

Dans ce mémoire nous aurons l'occasion de « toucher » à ces différents sujets. Mais avant cela quelques mots sur la classification des roches puis des minéraux.

2.1. Classification des roches

Une roche est un matériau formé de plusieurs minéraux. Une roche peut être formée d'une ou plusieurs espèces minérales. La classification des roches se fait en fonction de la composition, l'origine et les modalités de la formation.

On distingue :

- les roches magmatiques,
- les roches sédimentaires,
- les roches métamorphiques.

 \rightarrow Les roches magmatiques ou ignées sont formées par la solidification de magmas. Elles sont classées en fonction de leur mode de mise en place, de leur composition minéralogique et de leur composition chimique.

On distingue en fonction du mode de solidification :

- les roches volcaniques ou extrusives qui se solidifient en surface, composées de cristaux et de pâte peu ou pas cristallisée.
- les roches plutoniques ou intrusives qui se solidifient en profondeur, composées uniquement de cristaux.
- les roches intermédiaires ; entre les extrusives et les intrusives.

On distingue en fonction de la composition minéralogique et en particulier du degré de saturation en silice les roches selon la classification de Strekeisen (figure 5).

Parallèlement, on peut réaliser une analyse chimique globale indépendamment des minéraux qui la constituent. C'est la teneur en silice (SiO₂) qui va donner son caractère à la roche magmatique. On distingue :

- les roches acides contenant au moins 66% de SiO₂ et des teneurs faibles en fer, magnésium et calcium,
- les roches intermédiaires contenant entre 52 et 66% de SiO₂,
- Les roches basiques contenant entre 45% et 52% de SiO₂
- les roches ultrabasiques ou ultramafiques contenant moins de 45% de SiO₂ et riches en fer, magnésium et calcium.

On détermine par ailleurs le caractère alumineux ou alcalin d'une roche par le rapport entre l'alumine (Al) et les alcalins majeurs (Na, K).



- Roches volcaniques

Figure 5 : La classification de Streckeisen²

ZwebVWXfZK3R1dfTVJTE=&ei=_fUYS8-

² <u>http://www.google.fr/imgres?imgurl=http://svt.ac-dijon.fr/schemassvt/IMG/classif_streckeisen-501x545.jpg&imgrefurl=http://svt.ac-</u>

dijon.fr/schemassvt/article.php3%3Fid_article%3D135&h=545&w=501&sz=36&tbnid=CWCKsQh21xRdsM:&tbn h=133&tbnw=122&prev=/images%3Fq%3DStreckeisen&hl=fr&usg=__Of98aw-

tFY794AbDoOT2Ag&sa=X&oi=image_result&resnum=2&ct=image&ved=0CAkQ9QEwAQ

 \rightarrow Les roches sédimentaires se forment par accumulation et compactage de débris minéraux et organiques ou de précipitations chimiques. Elles se présentent généralement en couches ou strates.

On les classe selon leur mode de formation.

On distingue :

- Les roches sédimentaires détritiques ; terrigènes ou pyroclastiques. Les roches détritiques sont elles mêmes classées en fonction de leur granulométrie. Les grés sont des accumulations de grains de quartz, les pélites sont des accumulations de grains très fins d'argiles.
- Les roches sédimentaires évaporitiques : roches à gypse, halite, dolomite...
- Les roches sédimentaires organogènes : typiquement les calcaires, mais aussi les hydrocarbures (Roches carbonées).
- Les roches sédimentaires résiduelles : issues du lessivage des éléments mobiles ; typiquement les bauxites (Roches alumineuses)

 \rightarrow Les roches métamorphiques sont le résultat de la transformation de roches préexistantes sous l'action de la déformation, de la température et de la pression causant des changements minéralogiques et/ou de texture. Les roches préexistantes peuvent être des roches ignées, des roches métamorphiques ou des roches métamorphiques plus anciennes. Les roches métamorphiques ont des caractéristiques très différentes selon leur composition, la température, la pression et les différentes phases de métamorphisme. C'est pour cette raison qu'il est difficile de les classifier. On peut cependant les distinguer par les conditions de leur formation : Selon la place des minéraux contenus dans la roche dans la chaine d'apparition successive du métamorphisme ; chlorite, biotite, staurotide... Selon la profondeur, selon la composition et sa comparaison avec des minéraux ayant des conditions de formation voisines, selon les conditions de température et de pression du métamorphisme et la succession des étapes, etc.

Le métamorphisme ne change pas la composition chimique globale des roches à l'exception des fluides (eau, CO₂).

Les roches métasomatiques sont des roches métamorphismes particulières qui ont vu leur composition chimique globale changer sous l'effet d'intense circulation de fluides (eau, CO₂) qui équilibrent à l'échelle plurimétrique des contacts entre des roches au chimisme constrasté. Les skarns sont des roches riches en calcium produites par contact et réaction chimique à haute température entre une solution contenue dans une roche ignée et le CO2 contenu dans des carbonates. Les atomes de Si, Fe, Al, Mg présents dans les fluides agissent avec les carbonates changeant leur composition chimique. Les skarns sont des lieux de formation de minéraux rares.

2.2. Classification des minéraux

La **classification des minéraux** est la répartition systématique des espèces minérales en classes, sous classes, groupes, espèces et variétés suivant des caractères communs propres à en faciliter l'étude.

La classification des minéraux dite cristallochimie se fonde à la fois sur les différences de chimie et de structure cristalline.

Le premier niveau de classification des minéraux en <u>classes</u> est fondé sur la composition chimique et plus particulièrement sur la présence de certains groupements anioniques.

- Les éléments natifs
- Les sulfures et dérivés avec l'ion S²⁻ comme unité de base,
- les oxydes et hydroxydes avec O²⁻ ou OH⁻ comme unité de base,
- les halogénures ; fluorures, chlorures, iodures, bromures, astatures avec un ion halogène F⁻, Cl⁻, Br⁻, I⁻, At⁻ comme unité de base,
- les carbonates, les nitrates et les borates avec les groupements anioniques $CO_3^{2^2}$, $NO_3^{2^2}$, $BO_3^{2^2}$ comme unités de base,
- les sulfates et dérivés avec le groupement anionique SO_4^{2-} comme unité de base,
- les phosphates et dérivés avec le groupement anionique PO_4^{3-} comme unité de base,
- les silicates avec le groupement anionique SiO_4^{4-} comme unité de base et
- les minéraux organiques.

Dans la classe des silicates, par exemple, l'unité chimique de base du minéral est SiO_4^{4-} dans laquelle l'ion silice (Si^{4+}) est au centre d'un tétraèdre formé par quatre ions oxygène (O^{2-}). L'ion Si est chargé ⁺⁴ et les quatre ions O sont chargés ⁻² ce qui laisse à chaque ion O du groupe SiO₄ une charge de ⁻¹. Les tétraèdres SiO₄ se lient facilement entre eux formant des structures à la géométrie plus ou moins compliquée.

La classe des silicates contient les six sous classes fondées sur la géométrie moléculaire :

- Les nésosilicates dans lesquels les structures tétraédriques SiO₄ ne sont pas liées entre elles directement mais sont séparées par un cation métallique,
- les sorosilicates dans lesquels deux tétraèdres SiO₄ se lient entre eux formant des doubles tétraèdres de structure Si₂O₇⁶⁻, elles mêmes reliées par des cations métalliques,
- les inosilicates dans lesquels les tétraèdres sont liés entre eux formant des chaines, simples ou doubles de SiO₃²⁻,
- Les cyclosilicates qui contiennent une structure en anneaux de trois, quatre ou six tétraèdres ; Si₃O₉, Si₄O₁₂, Si₆O₁₈,
- les phyllosilicates dans lesquels les tétraèdres sont arrangés en feuilles formant des structures Si₄O₁₀,
- les tectosilicates (frameworks) dans lesquels les tétraèdres, reliés entre eux par un atome d'oxygène, sont interconnectés dans toutes les directions pour former un réseau de SiO₂.

Les classes et les sous classes obéissent à des considérations chimiques tandis que les groupes sont des subdivisions structurales au sein des sous classes.

Les sous classes sont divisées en groupes suivant deux critères :

- Les substitutions partielles dans les groupements anioniques comme Al à la place de Si dans certains silicates comme les feldspaths ou les feldspathoïdes,
- Les cations qui vont compenser la charge négative des groupements anioniques pour donner une structure neutre.

La sous classe des tectosilicates contient, entre autre, les groupes suivants :

- Le groupe des feldspaths,
- le groupe des felspathoïdes ; minéraux ignés pauvres en silice qui auraient été transformés en feldspaths si plus de dioxyde de silicium (SiO₂) avait été présent dans le magma. L'aluminium remplace la silice dans la structure tétraédrique. Le rapport

Al/Si est dans les felspathoïdes de 1/1 alors qu'il est généralement de 1/3 pour les feldspaths. La structure contient également des cavités qui sont comblées par de gros ions carbonates ou sulfates.

On ne trouve pas de feldspathoïdes dans des roches ignées contenant du quartz.

Les groupes sont divisés en <u>espèces</u> selon le degré de substitution de l'atome principal dans le groupement anionique et la nature des cations compensateurs. Une espèce est définie par une composition chimique et une structure cristalline.

A noter que parfois il y a des groupes dans les groupes comme le groupe de la sodalite ou le groupe de la cancrinite, appartenant au groupe des feldspathoïdes.

Les espèces sont divisées en <u>variétés</u> dont le critère de distinction est celui de la couleur ou plus rarement de la morphologie.

2.3. Chaung-gyi, dans la zone minière de Mogôk



Mogôk est à mi-chemin entre Mandalay et Bhamo (Figure 6).

Figure 6 : Carte de Myanmar

La région minière de Chaung-gyi est située près du village de Chaung-gyi à 7 kilomètres de Mogôk. Les coordonnées de la mine sont : 22°57'51''N. 96°30'32''E 1286 mètres au dessus du niveau de la mer (Figure 7 et 8).



Figure 7 : Google Earth ; la région minière de Chaung-gyi



Figure 8 : Carte des mines dans le secteur de Chaung-gyi (Themelis, 2008, p.28)

Les mines du secteur de Chaung-gyi (Figure 8 et 9) produisent principalement des saphirs bleus et des spinelles. Occasionnellement on y trouve de la cordiérite et de la lazurite. Ces gemmes sont extraites des dépôts alluvionnaires en utilisant la technique à ciel ouvert et de l'eau sous pression



Figure 9 : Photo du secteur minier de Chaung-gyi-ah-le-ywa (Themelis, 2008, p.29)

2.4. Géologie de la région de Mogôk

Nous avons rédigé ce texte à partir du chapitre 1 : Geology of Mogôk, du livre de Ted Themelis, Gems and Mines of Mogôk (Themelis, 2008).

La zone métamorphique de Mogôk est une longue bande étroite (1500 kilomètres/20 à 40 kilomètres)

sigmoïdale orientée nord-sud, entre la faille de Sagaing à l'ouest et la faille Shan à l'est. Elle va du golfe de Martaban au sud jusqu'à Putao au nord en passant par Mandalay et Mogôk. On l'appelle la ceinture métamorphique de Mogôk (Figure 10).



Figure 10 : La ceinture métamorphique de Mogôk (Themelis, 2008, p.22)

Le métamorphisme a joué un rôle primordial dans l'évolution géologique de Mogôk. Il y a eu deux périodes de métamorphisme ; La première période a eu lieu dans des conditions de haute pression et de relativement basse température (50 à 30 millions d'années, étape 4-5 figure 11), la seconde dans des conditions de basse pression et de haute température (20 à 15 millions d'années, étape 5-6 figure 11). Ces conditions de basse pression et haute température ont permis la formation des marbres à rubis dans la région de Mogôk. Remarquons que dans le nord du pays ce sont les conditions opposées qui ont permis la formation de jadéite.



Figure 11 : Diagramme des pressions et températures des principaux évènements géologiques de Mogôk, (Themelis, 2008, p.18).

A Mogôk on trouve du métamorphisme régional et du métamorphisme de contact. Le métamorphisme de contact est souvent du métasomatisme associé à des skarns. La ceinture métamorphique de Mogôk est formée de roches métamorphiques; des micaschistes, des marbres, des roches calco-silicatées, du gneiss et un peu de quartzite. Elles sont souvent pénétrées par des roches ignées; syénite, leucogranite, microgranite et des pegmatites.

L'évolution géologique de Mogôk s'est faite en six étapes (Figure 11 et 12) elle est liée étroitement à la tectonique des plaques.

- 1. Sédimentation
- 2. Première intrusion magmatique
- 3. Subduction, déformation
- 4. Métamorphisme de haute pression et température basse
- 5. Métamorphisme et métasomatisme de basse pression et haute température
- 6. Exhumation et érosion

Nous donnerons dans un premier paragraphe des informations sur le phénomène de la tectonique des plaques puis nous étudierons les différentes étapes de l'évolution géologique de Mogôk.

La tectonique des plaques

Des plaques tectoniques ou lithosphériques forment la croute terrestre et une partie superficielle du manteau. Ces plaques se déplacent de quelques centimètres par an dans diverses directions et provoquent la formation de zones de divergence ou convergence entraimant une subduction, collision ou coulissage. La convergence est le rapprochement de deux plaques, il peut y avoir collision (confrontation de deux plaques) ou/et subduction (passage d'une plaque au dessous d'une autre) ou coulissage (déplacement latéral d'une plaque contre l'autre).

Les six étapes de l'évolution géologique de Mogôk

Première étape : sédimentation

Il y a des centaines de millions d'années, la mer recouvrait la région de Mogôk. Des couches de sédiments provenant de l'érosion des roches anciennes et de la précipitation biochimique des carbonates se déposent selon la séquence suivante ; grés, schistes et calcaire en plaques, schistes argileux (riches en aluminium), schistes et calcaire en plaques.

Deuxième étape : première intrusion magmatique

Pendant la période allant de 200 à 150 millions d'années, des roches magmatiques pénètrent les couches de sédiments.

Troisième étape : subduction, déformation

De 150 à 50 millions d'années le processus de convergence des plaques tectoniques provoque une subduction et déformation géologique.

Quatrième étape : métamorphisme de haute pression et basse température

Le processus de convergence des plaques continentales a provoqué pendant la période de 50 à 30 millions d'années, la subduction oblique de la plaque indienne sous la plaque asiatique et la microplaque birmane ; L'Himalaya se forme. Cette collision génère une énorme compression métamorphosant les couches de roches sédimentaires et les intrusions magmatiques du premier cycle magmatique. Ce métamorphisme de haute pression (12 kilobars) mais avec des températures relativement basses (450°C) n'a pas été suffisant pour fondre les roches en présence. Le calcaire a été changé en marbre, le gré en quartzite, le schiste en paragneiss et le granite en orthogneiss.

Cinquième étape : métamorphisme et métasomatisme de basse pression et haute température

La période de relâchement et de rebond des plaques (20 à 15 millions d'années) qui a suivi la collision a fait augmenté la température (max 750°C) et baisser la pression (7-8 kilobars) provoquant une nouvelle phase de métamorphisme, de métasomatisme et de déformation ductile sigmoïdale des roches de la région de Mogôk. C'est à cette période que se forment les gemmes.

Sixième période : exhumation et érosion

Pendant la période de fin de cycle tectonique la température et la pression baissent, les montagnes s'érodent et les roches métamorphiques jusqu'alors enfouies apparaissent. Ce phénomène continue de nos jours. C'est pendant cette période que se sont formés les gisements secondaires.



Les informations sont résumées dans le tableau suivant :

Figure 12 : Chronologie de la formation et de l'évolution des roches de Mogôk (Themelis, 2008, p.23)

2.5. Géologie de Chaung-gyi

La plupart des roches ignées que l'on rencontre dans la région de Mogôk sont le résultat de la collision des plaques indienne et asiatique. Le magma formé profondément remonte au niveau de la croute terrestre. Il est constitué d'éléments chimiques abondants comme la silice, l'aluminium, le potassium, le calcium, le sodium, le fer, le manganèse, mais aussi d'éléments chimiques rares. En se refroidissant, le magma se solidifie et cristallise. Les éléments rares ne s'intègrent pas aux minéraux courants qui se forment (quartz, feldspaths, micas, amphiboles, pyroxènes) et se concentrent dans des magmas résiduels qui pénètrent les roches environnantes et forment des pegmatites en se refroidissant. Ce sont ces points d'interaction qui jouent un rôle important dans la formation de nouvelles roches et gemmes rares.

Il y a donc deux phénomènes :

- Les roches ignées peuvent pénétrer d'autres roches ignées préexistantes, des roches métamorphiques ou sédimentaires donnant des assemblages inattendus de minéraux (minéraux d'origine ignée côtoyant des minéraux d'origine métamorphique par exemple).
- Des minéraux nouveaux et/ou rares se forment ainsi au niveau des points de contact. Ils sont, bien entendu, différents suivant la nature chimique du liquide pegmatitique et de la roche en contact.

Des skarns se forment aux points de contact entre roches ignées et roches carbonatées par métasomatisme. Il est à noter que les roches intrudées et intrudantes ne se mélangent habituellement pas (sauf à l'état de magmas liquides). Les contrastes ne forment des « mélanges » bizarres que s'il y a métasomatisme ; donc intense circulation de fluides.

A Chaung-gyi, comme dans toute la ceinture métamorphique de Mogôk, le leucogranite est la roche ignée la plus abondante. Le leucogranite pénètre souvent les roches métamorphiques, gneiss, marbre et roches calc-silicatées. Les points de contact sont toutefois limités et dispersés.

Il y a de fortes chances pour que la roche qui nous préoccupe, n'étant pas une roche classique de Mogôk, soit une roche réactionnelle résultant d'une réaction chimique impliquant des éléments ou des minéraux pas forcément très communs. Nous le confirmerons ou non ultérieurement.

3. MATERIAUX ET METHODES

3.1. Description des échantillons

Nous avons à notre disposition deux séries d'échantillons : les échantillons provenant de l'achat initial (Figure 14) puis ceux achetés par Olivier Segura lors d'un voyage en Birmanie quelques mois après (Figure 15).

Notre roche inconnue est une roche opaque aux couleurs variées ; blanc, gris, différents bleus (bleu nuit, bleu roi, bleu clair, bleu vert), vert clair et vert foncé, marron vert, marron gris, se présentant sous forme de bandes alternées d'épaisseur moyenne (0,5 cm) et au contact flou et dentelé.

Echantillons provenant de l'achat initial (Figure 14)



Figure 14 : Photo des premiers échantillons de la roche inconnue

Les échantillons ont été pesés et mesurés puis placés dans des sachets séparés et numérotés de 1 à 8.

| CD1 | Poids | Dimensions |
|---|---------|------------|
| | 21,4 ct | H 2,5 cm |
| Contraction of the | | L 2,3 cm |
| Parton | | |
| 4 6 0 | | |
| | | |
| 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 | | |
| a all . | | |
| and the second se | | |

Echantillon CD1 utilisé au MEB pour la recherche de la relation couleur/chimie

| CD2 | Poids | Dimensions |
|--|----------|------------|
| | 20,60 ct | H 2,3 cm |
| A STREET, STREET, ST | | L 2,2 cm |
| State State of the | | |
| Constant of the | | |
| A CONTRACTOR | | |
| | | |
| and the second | | |

| CD3 | Poids | Dimensions |
|------------|----------|------------|
| | 20,90 ct | H 2,47 cm |
| All to 1 3 | | L 2,23 cm |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

Echantillon CD3 remis à Olivier Segura à titre d'échantillon modèle Echantillon CD3 utilisé pour l'examen de la luminescence

| CD4 | Poids | Dimensions |
|-----|----------|----------------------|
| | 37,05 ct | H 2,6 cm L 2,6 cm |
| | | |

| CD5 | Poids | Dimensions |
|-----|----------|----------------------|
| | 24,70 ct | H 2,3 cm L 2,3 cm |
| | | |

| CD6 | Poids | Dimensions |
|------------------|----------|------------|
| | 30,00 ct | H 3,2 cm |
| A STREET | | L 1,9 cm |
| All Control Ma | | |
| G THERE A | | |
| A REAL PROPERTY. | | |
| | | |

| CD7 | Poids | Dimensions |
|-----|----------|----------------------|
| | 29,70 ct | H 2,7 cm L 2,2 cm |

| CD8 | Poids | Dimensions |
|----------------------|----------|------------|
| | 23,05 ct | H 2,6 cm |
| C. AND | | L 2,4 cm |
| ALC: A DEL | | |
| All Aller Man Detail | | |
| | | |
| AND DESCRIPTION OF | | |
| | | |

Achat par Olivier Segura (Figure 15)



Figure 15 : Photo des échantillons rapportés par Olivier Segura

Les échantillons ont été pesés et mesurés puis placés dans des sachets séparés et numérotés de 9 à 16.

| CD9 | Poids | Dimensions |
|----------|----------|------------|
| | 73,80 ct | H 3,4 cm |
| | | L 3,2 cm |
| | | |
| A Strail | | |
| | | |
| | | |

Echantillon CD9 partiellement utilisé pour faire la lame mince 2 (coté pile) Echantillon CD9 utilisé pour l'examen de la luminescence (coté face)

| CD10 | Poids | Dimensions |
|------|-----------|------------|
| | 149,30 ct | H 4,1 cm |
| | | L 3,3 UII |

Echantillon CD10 utilisé pour l'examen de la luminescence

| CD11 | Poids | Dimensions |
|--|---------|------------|
| | 19,2 ct | H 2,5 cm |
| | | L 2,2 cm |
| | | |
| S. Bask | | |
| A REAL PROPERTY | | |
| A DESCRIPTION OF THE OWNER OWNER OF THE OWNER OWNER OF THE OWNER OWNE | | |
| | | |

Echantillon CD11 utilisé pour la fabrication de la lame mince 1

| CD12 | Poids | Dimensions |
|---------|----------|------------|
| A SALES | 55,80 ct | H 4,2 cm |
| | | 2 1,7 0 |

| CD13 | Poids | Dimensions |
|--|---------|------------|
| | 61,4 ct | H 3,6 cm |
| A STATEMENT | | L 2,48 cm |
| Statute and | | |
| | | |
| | | |
| Contraction of the local division of the loc | | |

| CD14 | Poids | Dimensions |
|-------------------------|---------|------------|
| | 72,5 ct | H 3,8 cm |
| and the second | | L 3 cm |
| ASSISTER A. | | |
| ASSA STORE | | |
| A State State State | | |
| the state of the second | | |
| | | |

| CD15 | Poids | Dimensions |
|-----------|----------|------------|
| A | 15,75 ct | H 2,26 cm |
| 115 | | L 2,05 Cm |
| 177 BA | | |
| 100 March | | |
| | | |

| CD16 | Poids | Dimensions |
|--|-----------|------------|
| | 131,25 ct | H 4,2 cm |
| | | L 4,1 cm |
| | | |
| 10 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 | | |
| | | |
| Constant of the second second | | |
| | | |

3.2. Méthodes utilisées

Certains des échantillons ci-dessus, qu'ils soient réduits en lame minces ou tels quels ont été étudiés au microscope polarisant, au microscope électronique à balayage (MEB) et en diffusion Raman afin de déterminer les matériaux les composant.

3.2.1. Lames minces au microscope pétrographique polarisant

L'atelier de lithopréparation du LPGN de l'Université des Sciences de Nantes a préparé deux lames minces à partir de deux des échantillons (Figure 16 et 17). Ces lames seront examinées au microscope pétrographique polarisant puis photographiées.





Figure 16 : Echantillon CD9 utilisé pour la lame mince 1 Figure 17 : Echantillon CD11 utilisé pour la lame mince 2

Une mince lame de l'échantillon est collée sur une lame de verre puis meulée au carbure de silicium jusqu'à atteindre une épaisseur de 60 à 30 microns (Figure 18).



Figure 18: Meulage des lames minces

Figure 19: Microscope pétrographique polarisant

Nous déterminons les zones d'intérêt au microscope pétrographique (Figure 19) puis nous les entourons d'un trait au feutre permanent et préparons un schéma des points à examiner (Figure 20). Ces zones seront étudiées avec des objectif X4 et X10, tout d'abord avec un polariseur puis avec les polariseurs croisés. Elles seront chaque fois photographiées.



Figure 20 : Schéma des points à étudier sur la lame mince 1

3.2.2. Microscope Electronique à Balayage (MEB)

Nous utilisons le MEB afin de déterminer la composition chimique et de réaliser une image rétrodiffusée des minéraux constituants les zones de différentes couleurs de notre échantillon de roche.

Nous avons réalisé deux études une sur la lame mince 1 provenant de l'échantillon CD9 afin de lier les éléments d'information provenant du microscope pétrographique polarisé et du Raman, l'autre sur l'échantillon CD1 afin de lier couleur et minéral.

Dans cette étude nous travaillons sur les électrons rétrodiffusés (Back Scattered Electrons ; BSE). Un faisceau d'électrons primaires généré par un canon à électrons balaye la surface à analyser. Les électrons du faisceau primaire rebondissent sur le noyau des atomes de l'échantillon et repartent selon une trajectoire quelque peu modifiée. La quantité d'électrons rétrodiffusés dépend de la nature de l'atome composant l'échantillon. L'analyse des électrons rétrodiffusés nous donnent une image. Les rayons X secondaires émis par les atomes excités par les électrons du faisceau primaire de la machine nous permettent d'accéder à la chimie grâce au détecteur de rayons X et d'identifier la composition chimique moyenne des différents cristaux de l'échantillon. Il faut noter que les éléments légers jusqu'au béryllium (Be) ne sont pas détectés. On ne détecte donc pas l'hydrogène. Nous ne pouvons donc pas voir l'eau dans les amphiboles ni le béryl dans le béryllium !

Nom de l'appareil et conditions expérimentales

Nom de l'appareil : JEOL 5800 LV

Conditions expérimentales : 20kV, 0,3 nA. Chaque spectre est une acquisition de 60 secondes.

Préparation des échantillons

L'échantillon doit être métallisé avec de la laque d'argent afin de le rendre conducteur. L'échantillon doit être propre et plat. Le faisceau d'électron primaire balaye la surface de l'échantillon, peu importe donc l'épaisseur de l'échantillon.

Préparation de la lame mince 1 provenant de l'échantillon OS1

Nous traçons un diagramme des points qui ont été tracés sur la lame mince afin de nous repérer lors du passage au MEB (Figure 21).



Figure 21 : Diagramme MEB de la lame mince 1

Préparation de l'échantillon CD1

L'échantillon CD1 est fixé sur un plot (boulon) en cuivre avec de laque d'argent (Figure 23). Sept zones à étudier sont marquées au feutre sur la surface de l'échantillon pour les retrouver facilement sous le faisceau (Figure 23).



Figure 23 : Echantillon CD1 préparé pour le MEB; Les cercles et les traits servent à repérer les zones d'intérêt.

Figure 22 : Diagramme MEB de l'échantillon CD1

Un diagramme de la roche et des zones à étudier est réalisé sur la feuille de travail (Figure 22). Les zones sont numérotées. Chaque zone est qualifiée par son numéro et sa couleur.

Point 1. Blanc Point 2. Vert Point 3. Bleu foncé Point 4. Vert foncé Point 5. Blanc Point 6. Bleu clair Point 7. Gris translucide

3.2.3. Spectrométrie Raman

Nous utilisons le spectroscope Raman afin de déterminer la structure moléculaire des minéraux constituants les zones de différentes couleurs de notre échantillon de roche.

Un faisceau de photons monochromatique est envoyé sur l'échantillon. Les molécules de l'échantillon empruntent ou restituent de l'énergie au faisceau et vibrent. La longueur d'onde du photon incident est modifiée d'une énergie correspondant à celle d'une vibration élémentaire ; le phonon. Le décalage d'énergie entre les photons incidents et les photons diffusés sont fonction de la nature de la molécule.

Le spectroscope Raman analyse le décalage d'énergie des photons diffusés. Le spectre Raman est caractéristique de la composition moléculaire de l'échantillon et de sa structure.

Nom de l'appareil et conditions expérimentales

Raman

 λ excitatrice : 514 nm

Plage de cm⁻¹ analysée : 100 à 1500 cm⁻¹

Puissance d'excitation : 200 mW

Préparation de l'échantillon

L'échantillon examiné n'a pas besoin d'une préparation particulière.

4. RESULTATS

Ci-dessous sont décrits les expériences effectuées et les résultats correspondants. Ces résultats sont des résultats bruts et ne feront, dans cette partie du mémoire, l'objet d'aucune interprétation. Ils n'ont pas encore donné lieu à interprétation et prendront tout leur sens ultérieurement.

4.1. Gemmologie classique

La gemmologie classique nous donne quelques pistes de travail mais malheureusement le gemmologue que nous sommes, avec ses outils de base; loupe, réfractomètre, balance hydrostatique ne pourra pas identifier exactement la composition de la roche que nous étudions.

4.1.1. Indice de réfraction

Comme avec toute roche nous sommes confrontés à un problème d'inhomogénéité.

L'indice de réfraction constaté sur le réfractomètre en méthode spot est variable mais aux alentours de 1,5. La méthode spot ne nous permet pas d'obtenir de données plus précises.

4.1.2. Densité

Nous sommes là aussi confrontés à un problème d'inhomogénéité.

La densité constatée sur la balance hydrostatique est variable suivant les échantillons mais aux alentours de 3.

4.1.3. Luminescence

Nous sommes toujours confrontés au même un problème d'inhomogénéité.

Pour examiner notre roche, nous utilisons deux lampes :

- A KRÜSS UV-lamp UV240 12 watts
- VL-6-LC 12 watts

Les photos ont été prises sous les conditions suivantes :

La lampe est placée à 12 cm au dessus de l'échantillon.

Le temps d'exposition est de 30 secondes pour les UV courts et de 20 secondes pour les UV long.

Les résultats sont identiques avec les deux lampes avec toutefois des intensités légèrement différentes.

L'aspect général est donné par les figures 26 à 31.

<u>UV courts 254 nm</u> Luminescence bleue Luminescence orange localisée Zones inertes <u>UV longs 365 nm</u> Luminescence orange Luminescence bleue localisée Zones inertes

- Des zones qui fluorescent bleu d'intensité moyenne en UV courts (Figures 24, 26, 28), fluorescent orange d'intensité moyenne en UV longs (Figure 25, 27, 28)
- Des zones qui fluorescent blanc en UV courts (Figure 24), fluorescent orange clair intense en UV longs (Figure 25)
- Certaines zones inertes en UV courts (figure 24), fluorescent orange clair intense en UV longs (Figure 25)
- Certaines zones inertes en UV courts (Figure 24) restent inertes en UV longs (Figure 25)
- Des zones qui fluorescent bleu-gris clair en UV courts (Figure 26), fluorescent bleu en UV longs (Figure 27)
- Les zones qui fluorescent orange clair d'intensité faible (Figure 28), fluorescent orange clair intense en UV longs (Figure 29)

Echantillon CD3



Figure 24 : Photo de l'échantillon CD3 sous UV courts UV longs



Figure 25 : Photo de l'échantillon CD3 sous

Echantillon CD9



Figure 26 : Photo de l'échantillon CD9 sous UV courts longs



Figure 27 : Photo de l'échantillon CD9 sous UV





Figure 28 : Photo de l'échantillon CD10 sous UV courts UV longs

Figure 29 : Photo de l'échantillon CD10 sous

4.1.4. Chelsea

Nous n'avons constaté aucune réaction de nos échantillons au filtre Chelsea.

4.1.5. Dureté, ténacité

<u>Ténacité</u>

Nous n'avons pas constaté de cassure lorsqu'on laisse tomber un échantillon d'une hauteur de 1,50m sur un sol carrelé.

Dureté

En essayant de rayer notre roche avec la pointe d'une paire de ciseaux nous constatons que le métal ne raye pas les zones de couleur bleue mais raye les zones de couleur blanche, grise et verte.

4.2. Lames minces

Nous avons choisi la lame mince 1 pour effectuer les expériences ci-dessous. La lame mince 1 contient tous les minéraux et les aspects observés sont donc représentatifs de l'ensemble des roches examinées.

4.2.1 Lame mince au microscope pétrographique polarisant

Nous photographions l'image au microscope pétrographique des points 1,2 et 3 avec un polariseur (LPNA) puis avec les polariseurs croisés (LPA) et avec un objectif X40 puis avec un objectif X100. A chaque point correspondent donc 4 photos. La zone noire externe correspond au point de feutre (Figures 32 à 43).

4.2.1.1. Point 1 ; lame mince 1 provenant de l'échantillon CD9



Figure 30: Photo point 1au microscope pétrographique avec LPNA et un objectif X40



Figure 31 : Photo point 1 au microscope pétrographique avec LPA et un objectif X40



Figure 32: Photo point 1 au microscope pétrographique avec LPNA et un objectif X100



Figure 33: Photo point 1 au microscope pétrographique avec LPA et un objectif X100

Description de la photo ci-dessus (Figure 35) :

Eléments losangiques blancs et gris, brillants, à relief important, comportant semble-t-il un noyau isotrope, orientés et intégrés dans une matrice dans laquelle il y a de petits cristaux arrondis.

Quatre éléments nous intéressent :

- Les éléments losangiques qui sont typiques d'une amphibole
- Les noyaux de couleur noire en LPA donc isotropes
- La matrice de couleur noire en LPA donc isotrope
- Les petits cristaux arrondis avec irisation du rose au vert

4.2.1.2. Point 2 ; lame mince 1 provenant de l'échantillon CD9



Figure 34: Photo point 2 au microscope pétrographique avec LPNA et un objectif X40



Figure 35: Photo point 2 au microscope pétrographique avec LPA et un objectif X40

Description de la photo ci-dessus (Figure 37) :

Groupe de minéraux en globule formé de :

• Un minéral comportant des macles lamellaires de couleur rosée avec irisation du rose au vert en globule ; très probablement de la calcite mais cela pourrait être aussi de la dolomie ou une autre carbonate rhomboédrique

- Un minéral isotrope apparaissant noir
- Un minéral à fort relief et polarisant dans le second ordre (teintes de polarisation de bleu à rouge) : typique des pyroxènes
- Un minéral de couleur grise
- Autour du globule minéral des petits éléments arrondis ou longilignes orientés multicolores



Figure 36 : Photo point 2 au microscope pétrographique avec LPNA et un objectif X100



Figure 37 : Photo point 2 au microscope pétrographique avec LPA et un objectif X100

Description de la photo ci-dessus (Figure 39) :

Groupe de minéraux en globule comportant :

• Un minéral comportant des macles lamellaires de couleur sombre et des teintes de polarisation élevées ; probablement de la calcite
- Un minéral isotrope apparaissant noir
- Un minéral à haute polarisation et relief important de couleur rosée avec irisation du rose au vert
- Un minéral de couleur grise
- Un minéral de couleur bleu-vert grisé foncé à polarisation haute et relief important typique des pyroxènes
- Autour du globule minéral de petits éléments longilignes orientés multicolores

4.2.1.3. Point 3 ; lame mince 1 provenant de l'échantillon CD9



Figure 38 : Photo point 3 au microscope pétrographique avec LPNA et un objectif X40



Figure 39 : Photo point 3 au microscope pétrographique avec LPA et un objectif X40

Description de la photo ci-dessus (Figure 41) :

Groupe de minéraux en globule comportant :

- Un minéral comportant des macles lamellaires de couleur sombre irisé du rose au vert ; probablement de la calcite
- Un minéral isotrope apparaissant noir veiné de blanc
- Un minéral vert veiné de noir irisé sur les bords
- Un minéral bleu canard veiné de blanc
- Des petits éléments longilignes orientés multicolores



Figure 40 : Photo point 3 au microscope pétrographique avec LPNA et un objectif X100



Figure 41 : Photo point 3 au microscope pétrographique avec LPA et un objectif X100

4.2.2. Résultats de la spectrométrie Raman

Nous étudions au Raman les différents éléments intéressants des points 1, 2 et 3 que nous avons individualisés ci-dessous.



4.2.2.1. Etude Raman du point 1



<u>Le spectre de l'élément 1a</u> (Figure 43) avec ses pics à 234, 664, 816, 1096 cm⁻¹ pourrait être assimilé à celui de l'**édénite** de Mogok R050415 du RRUFF excité à 532nm (Annexe-1). Les pics significatifs sont à **235**, 315, 388, 422, 518, **672**, bande large autour de 1040 cm⁻¹. On retrouve dans le spectre Raman du point 1a les pics principaux à **234** et **664** cm⁻¹, les autres points ne correspondent pas exactement à la référence du RRUFF.



Figure 43 : Spectre Raman du point 1a

<u>Le spectre de l'élément 1b</u> (Figure 44) avec ses pics à 548, 638, 816, 980, 1085-1102 cm⁻¹ pourrait être assimilé à celui d'un feldspathoïde isotrope ; la **Haüyne** X060005 du RRUFF excité à 514nm (Annexe-2). Les pics significatifs sont aux environs de 255, **437**, **545**, **988**, **1095** cm⁻¹. On retrouve dans le spectre Raman du point 1b les pics **430**, **548**, **980**, **1095** cm⁻¹. Nous sommes en présence de haüyne.





<u>Le spectre de l'élément 1c</u> (Figure 45) avec ses pics à 424, 545, 808, 978, 1090 cm⁻¹ pourrait être assimilé à celui d'un feldspathoïde isotrope ; la **Haüyne** X060005 du RRUFF excité à 514nm (Annexe-2). Les pics significatifs sont aux environs de 255, **437**, **545**, **988**, **1095** cm⁻¹. On retrouve dans le spectre Raman du point 1b les pics à **424**, **545**, **978**, **1090** cm⁻¹. Nous sommes en présence de haüyne.







<u>Le spectre de l'élément 1d</u> (Figure 46) avec ses pics à 326, 393, 663, 1011 cm⁻¹ est conforme à celui du **diopside** X050059 du RUFF excité à 785nm (Annexe-3). Les pics significatifs sont aux environs de **325, 393, 669, 1013** cm⁻¹. On retrouve exactement dans le spectre Raman du point 1b les pics principaux à **326, 393, 663, 1011** cm⁻¹. Il n'y a donc aucune ambiguïté sur la nature du minéral.



Figure 46 : Spectre Raman du point 1d

4.2.2.2. Etude Raman du point 2



Figure 47 : Eléments d'intérêt du point 2, lame mince 1, échantillon CD9, LPA

<u>Le spectre de l'élément 2a</u> (Figure 48) avec ses pics à 243, 427, 547, 983, 1093 cm⁻¹ correspond à celui d'un feldspathoïde isotrope ; la haüyne X060005 du RUFF excité à 514nm (Annexe-2). Les pics significatifs sont aux environs de **255, 437, 545, 990, 1095** cm⁻¹. On retrouve dans le spectre Raman du point 2b la totalité des pics. Il n'y a donc aucune ambiguïté sur la nature du minéral.

Intensité





Le spectre de l'élément 2b (Figure 49) avec ses pics à 392, 462, 567, 1090 cm⁻¹ correspond à celui de la **néphéline** R040025-3 du RUFF excité à 514nm (Annexe-4). Les pics significatifs



sont aux environs de 200, 223, 263, 347, **400, 462,** 495, 900, 1033, **1080** cm⁻¹. On retrouve dans le spectre Raman du point 2b les pics à **392, 462, 1090** cm⁻¹.

Figure 49 : Spectre Raman du point 2b

Le spectre de l'élément 2c (Figure 50) avec ses pics à 463, 668, 1012 cm⁻¹ et le spectre de l'élément 2d (Figure 50) avec ses pics à 463, 665, 984, 1010 cm⁻¹ correspondent curieusement à deux spectres ; celui du **diopside** X050059 du RUFF excité à 785nm (Annexe-3) et à celui de la **sodalite** R060354 du RUFF excité à 532mn (Annexe-5). Les pics significatifs du diopside sont aux environs de 325, 393, **669, 1013** cm⁻¹ ceux de la sodalite sont aux environs de 163, 263, 292, **460, 986**, 1057 cm⁻¹. On retrouve dans le spectre Raman du point 2d les points suivants : diopside ; **665, 1010** cm⁻¹ et sodalite ; **460, 984** cm⁻¹. On retrouve dans le spectre Raman du point 2c les points suivants : diopside **668, 1012** cm⁻¹, sodalite **463** cm⁻¹. Le Raman a du prendre en compte dans les spectres des points 2c et 2d deux matériaux différents mélangés.



Figure 50 : Spectre Raman des points 2c et 2d

Le spectre de l'élément 2e (Figure 51) avec ses pics à 142, 327, 391, 667, 854, 1012, 1046 cm⁻¹ est conforme à celui du **diopside** X050059 du RUFF excité à 785nm (Annexe-3). Les pics significatifs du diopside sont aux environs de **325, 393, 669, 1013** cm⁻¹. On retrouve dans le spectre Raman du point 2c les pics principaux à **327, 391, 667, 1012** cm⁻¹. Les pics à 142, 327, 854, 1046 cm⁻¹ correspondent à un minéral ou plusieurs minéraux pris en compte par le Raman en même temps que le diopside. Nous n'avons pas pu individualiser ce ou ces minéraux.



Le spectre de l'élément 2f (Figure 52) avec ses pics à **149**, **282**, **714**, **1085** cm⁻¹ est conforme à celui de la **calcite** R040170 du RUFF excité à 785nm (Annexe-6). Les pics significatifs de la calcite sont aux environs de **151**, **277**, **711**, **1085** cm⁻¹. On retrouve dans le spectre Raman du point 2f la totalité des pics de la calcite. Il n'y a aucune ambiguïté sur la nature du minéral constituant le point 2f.

Intensité



Figure 52 : Spectre Raman du point 2f

4.2.2.3. Etude Raman du point 3



Figure 53 : Eléments d'intérêt du point 3, lame mince 1, échantillon CD9, LPA

<u>Le spectre de l'élément 3f</u> (Figure 54) avec ses pics à 320, 391, 666, 1010 cm⁻¹ est conforme à celui du **diopside** X050059 du RUFF excité à 785nm (Annexe-3). Les pics significatifs sont aux environs de **325, 393, 669, 1013** cm⁻¹. On retrouve exactement dans le spectre Raman du point 1b les pics principaux du diopside. Il n'y a donc aucune ambiguïté sur la nature du minéral.





Le spectre de l'élément 3g (Figure 55) avec ses pics à **153**, **280**, **693**, **1085** cm⁻¹ est conforme à celui de la calcite R040170 du RUFF excité à 785nm (Annexe-6). Les pics significatifs de la calcite sont aux environs de **151**, **277**, **711**, **1085** cm⁻¹. On retrouve dans le spectre Raman du point 3g la totalité des pics de la calcite. Il n'y a aucune ambiguïté sur la nature du minéral.

Intensité





<u>Le spectre de l'élément 3h a</u> été vérifié rapidement en spectroscopie exploratoire. Il est conforme à celui du **diopside** X050059 du RUFF excité à 785nm (Annexe-3). Il n'y a aucune ambiguïté sur la nature du minéral.

Le spectre de l'élément <u>3i</u> (Figure 56) avec ses pics à 261, 295, 464, 985 cm⁻¹ est conforme au spectre de la **sodalite** R060354 du RUFF excité à 532nm (Annexe-5). Les pics significatifs de la sodalite sont aux environs de 163, **263**, **292**, **460**, **986**, 1057 cm⁻¹. On retrouve dans le spectre Raman du point <u>3i</u> les points suivants : **261**, **295**, **464**, **985** cm⁻¹. Il n'y a aucune ambiguïté sur la nature du minéral.



Figure 56 : Spectre Raman du point 3i

<u>Le spectre de l'élément 3j</u> (Figure 57) avec ses pics à 321, 393, 665, 1011 cm⁻¹ est conforme à celui du **diopside** X050059 du RUFF excité à 785nm (Annexe-3). Les pics significatifs sont aux environs de **325, 393, 669, 1013** cm⁻¹. On retrouve dans le spectre Raman du point 3j tous les pics du diopside. Il n'y a aucune ambiguïté sur la nature du minéral.



Figure 57 : Spectre Raman du point 3j

Le spectre de l'élément 3k (Figure 58) avec ses pics à 255, 327, 393, 429, 550, 582, 666, 982, 1012, 1094 cm⁻¹ est conforme à celui du **diopside** X050059 du RUFF excité à 785nm (Annexe-3). Les pics significatifs sont aux environs de **325, 393, 669, 1013** cm⁻¹. On retrouve dans le spectre Raman du point 1b tous les pics du diopside. Il n'y a aucune ambiguïté sur la nature du minéral. On trouve par ailleurs des pics à 225, 429, 550, 582, 982, 1094 cm⁻¹ qui correspondent au spectre de la **haüyne** X060005 du RRUFF (Annexe-2). Les pics significatifs sont aux environs de **255, 437, 545, 988, 1094** cm⁻¹. Le spectroscope de Raman a donc pris en compte les deux minéraux.



Figure 58 : Spectre Raman du point 3k

<u>Le spectre de l'élément 31</u> (Figure 59) avec ses pics à 323, 395, 663, 1012 cm⁻¹ est conforme à celui du **diopside** X050059 du RUFF excité à 785nm (Annexe-3). Les pics significatifs sont aux environs de **325, 393, 669, 1013** cm⁻¹. On retrouve dans le spectre Raman du point 3j tous les pics du diopside. Il n'y a aucune ambiguïté sur la nature du minéral.



Figure 59 : Spectre Raman du point 31

Le spectre de l'élément 3m avec ses pics à 281, 324, 392, 666, 712, 1012, 1085 cm⁻¹ est conforme à celui de la calcite R040170 du RUFF excité à 785nm (Annexe-6). Les pics significatifs de la calcite sont aux environs de 151, 277, 711, 1085 cm⁻¹. On retrouve dans le spectre Raman du point 3m les pics à 281, 712, 1085 cm⁻¹. Le spectre de l'élément 3m est aussi conforme à celui du diopside X050059 du RUFF excité à 785nm (Annexe-3). Les pics significatifs sont aux environs de 325, 393, 669, 1013 cm⁻¹. On retrouve dans le spectre Raman du point 3m les pics à 324, 392, 66, 1012 cm⁻¹. Il n'y a aucune ambiguïté sur la nature des minéraux présents. Le spectroscope de Raman a bien pris en compte deux minéraux.



Figure 60 : Spectre Raman du point 3m

<u>Les spectres des éléments 3n, o, p</u> (Figure 60) pourrait être assimilé à celui d'un feldspathoïde ; la **Haüyne** X060005 du RRUFF excité à 514nm (Annexe-2). Les pics significatifs sont aux environs de 255, 437, **545**, **988**, **1095** cm⁻¹. On retrouve dans le spectre Raman des points 3n, o, p les pics **545**, **988** et **1090** cm⁻¹. Nous sommes en présence de haüyne. La haüyne peut être isotrope ou anisotrope, elle peut donc vraisemblablement se trouver dans des points noirs (isotrope) ou gris (anisotrope) au microscope polarisé (Xu & Veblen, 1995).



Figure 61 : Spectre Raman des points 3 n, o, p

4.2.3. Résultats du MEB

Nous analysons, s'il reste un doute dans la nature des minéraux en présence, soit les mêmes zones que précédemment afin de confirmer ou non les résultats du microscope pétrographique polarisant et du spectroscope de Raman (Point 1 et 2) soit de nouvelles zones non encore explorées (Point 3). Les formules chimiques seront recherchées dans : Fleisher's Glossary of Mineral Species (Mandarino, 1999).

4.2.3.1. Point 1 ; Lame mince 1 provenant de l'échantillon CD9

Photo MEB



Figure 62 : Photo MEB de la lame mince 1, échantillon CD9, point 1 (BSE)

Lame mince 1, échantillon CD9, point 1a

Spectre



Figure 63 : Spectre MEB de la lame mince 1, échantillon CD9, point 1a

Chimie quantitative

| Eléments | % | % | Calculs de |
|----------|--------------------|----------|-------------|
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | | structurale |
| Ca | 8,61 | 5,07 | 2 |
| Mg | 12,08 | 11,73 | 5 |
| Na | 2,24 | 2,3 | 1 |
| Κ | 0,27 | 0,16 | Traces |
| Si | 19,92 | 16,73 | 7 |
| Al | 5,74 | 5,02 | 2 |
| 0 | 40,01 | 59 | 25 |
| Total | 88,87 | 100,01 | |

Figure 64 : Tableau de chimie quantitative MEB de la lame mince 1, échantillon CD9, point 1a

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : Na $Ca_2Mg_5Si_7Al_2O_{25}$ avec des traces de potassium. Elle est compatible avec la formule chimique de l'<u>édénite</u> NaCa_2Mg_5Si_7AlO_{22}(OH)_2 mais aussi avec la formule chimique de la <u>pargasite</u> Na $Ca_2(Mg_5Fe^{2+})_4Al(Si_6Al_2)O_{22}(OH)_2$.

Lame mince 1, échantillon CD9, point 1b

Spectre



Figure 65 : Spectre MEB de la lame mince 1, échantillon CD9, point 1b

Chimie quantitative

| Eléments | % | % | Calculs de |
|----------|--------------------|----------|-------------|
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | | structurale |
| Ca | 0,43 | 0,25 | Traces |
| Na | 14,22 | 14,70 | 4 |
| Cl | 5,32 | 3,57 | 1 |
| Si | 15,25 | 12,90 | 3 |
| Al | 14,60 | 12,86 | 3 |
| S | 0,42 | 0,31 | Traces |
| 0 | 37,31 | 55,41 | 15 |
| Total | 87,55 | 100 | |

Figure 66 : Tableau de chimie quantitative MEB de la lame mince 1, échantillon CD9, point 1b

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $Na_4Al_3Si_3O_{15}Cl$ avec des traces de calcium et de soufre.

Elle est compatible avec la formule chimique de la s<u>odalite</u> dont la formule est $Na_8Al_6Si_6O_{24}Cl_2$ ou $Na_4Al_3(SiO_4)_3Cl$ suivant les auteurs.

Lame mince 1, échantillon CD9, point 1c

Spectre

Identique au point 1b

Chimie quantitative

| Eléments | % | % | Calculs de |
|----------|--------------------|----------|-------------|
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | | structurale |
| Ca | 0,15 | 0,09 | Traces |
| Na | 13,86 | 14,23 | 4 |
| Cl | 5,31 | 3,54 | 1 |
| Si | 15,34 | 12,89 | 3 |
| Al | 15,03 | 13,15 | 3 |
| S | 0,54 | 0,40 | Traces |
| 0 | 37,74 | 55,69 | 16 |
| Total | 87,97 | 99,99 | |

Figure 67 : Tableau de chimie quantitative MEB de la lame mince 1, échantillon CD9, point 1c

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $Na_4Al_3Si_3O_{16}Cl$ avec des traces de calcium et de souffre.

Elle est compatible avec la formule chimique de la <u>sodalite</u> dont la formule est $Na_8Al_6Si_6O_{24}Cl_2$ ou $Na_4Al_3(SiO_4)_3Cl$ suivant les auteurs.

Lame mince 1, échantillon CD9, point 1d



Figure 68 : Spectre MEB de la lame mince 1, échantillon CD9, point 1d

Chimie quantitative

| Eléments | 0/2 | 0/_ | Calculs de |
|--------------|--------------------|----------|-------------|
| Licification | | /0 | |
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | | structurale |
| Ca | 17,29 | 9,94 | 1 |
| Mg | 9,97 | 9,45 | 1 |
| Si | 23,80 | 19,53 | 2 |
| Al | 1,22 | 1,04 | Traces |
| 0 | 41,67 | 60,03 | 6 |
| Total | 93,95 | 99,99 | |

Figure 69 : Tableau de chimie quantitative MEB de la lame mince 1, échantillon CD9, point 1d

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $CaMgSi_2O_6$ avec des traces d'aluminium. Elle est compatible avec la formule chimique du <u>diopside</u> dont la formule générale est $CaMgSi_2O_6$.

Spectre



4.2.3.2. Point 2 ; Lame mince 1 provenant de l'échantillon CD9

Figure 70 : Photo MEB de la lame mince 1, échantillon CD9, point 2 (BSE)

Lame mince 1, échantillon CD9, point 2a

Spectre



Figure 71 : Spectre MEB de la lame mince 1, échantillon CD9, point 2a

Chimie quantitative

| Eléments | % | % | Calculs de |
|----------|--------------------|----------|-------------|
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | | structurale |
| Ca | 2,04 | 1,06 | Regroupé |
| | | | avec Na |
| Cl | 0,41 | 0,24 | Traces |
| Na | 14 | 12,67 | 4-5 |
| Κ | 0,53 | 0,28 | Traces |
| Si | 16,68 | 12,35 | 4-5 |
| Al | 15,86 | 12,23 | 4-5 |
| S | 4,04 | 2,62 | 1 |
| 0 | 45,04 | 58,55 | 22 |
| Total | 98,6 | 100 | |

Figure 72 : Tableau de chimie quantitative MEB de la lame mince 1, échantillon CD9, point 2a

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $(Na,Ca)_5Al_5Si_5O_{22}S$ avec des traces de chlore et de potassium.

Elle est compatible avec la formule chimique d'un minéral du groupe de la sodalite ; la <u>haüyne</u> $(Na,Ca)_{4-8}Al_6Si_6(O,S)_{24}(SO_4,Cl)_{1-2}$

Lame mince 1, échantillon CD9, point 2b

Spectre



Figure 73 : Spectre MEB de la lame mince 1, échantillon CD9, point 2b

Chimie quantitative

| Eléments | % | % | Calculs de |
|----------|--------------------|----------|-------------|
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | | structurale |
| Ca | 1,42 | 0,70 | Traces |
| Cl | 0,05 | 0,03 | Traces |
| Na | 12,49 | 10,66 | 1 |
| Κ | 1,90 | 0,95 | Regroupé |
| | | | avec Na |
| Si | 21,77 | 15,21 | 1 |
| Al | 19,52 | 14,20 | 1 |
| 0 | 47,48 | 58,24 | 4 |
| Total | 104,63 | 99,99 | |

Figure 74 : Tableau de chimie quantitative MEB de la lame mince 1, échantillon CD9, Point 2b

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $(Na,K)AlSiO_4$ avec des traces de calcium et de chlore. Elle est compatible avec la formule chimique de la <u>néphéline</u> $(Na,K)AlSiO_4$.

Lame mince 1, échantillon CD9, point 2c

Spectre

Spectre identique au point 1b

Chimie quantitative

| Eléments | % | % | Calculs de |
|----------|--------------------|----------|-------------|
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | | structurale |
| Ca | 0,30 | 0,14 | Traces |
| Cl | 6,53 | 3,37 | 1 |
| Na | 19,40 | 15,42 | 4 |
| Κ | 0,02 | 0,01 | Traces |
| Si | 19,32 | 12,57 | 3 |
| Al | 19,20 | 13 | 3 |
| S | 0,57 | 0,32 | Traces |
| 0 | 48,30 | 55,16 | 16 |
| Total | 113,64 | 99,99 | |

Figure 75 : Tableau de chimie quantitative MEB de la lame mince 1, échantillon CD9, point 2c

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $Na_4Al_3Si_3O_{16}Cl$ avec des traces de calcium, de potassium et de soufre.

Elle est compatible avec la formule chimique d'un minéral du groupe de la sodalite dont la formule générale est : $(Na,Ca)_{4-8}Al_6Si_6(O,S)_{24}(SO_4,Cl(OH),S)_{1-2}$; La s<u>odalite</u> dont la formule est $Na_8Al_6Si_6O_{24}Cl_2$ ou $Na_4Al_3(SiO_4)_3Cl$ suivant les auteurs.

Lame mince 1, échantillon CD9, point 2d

Spectre

Spectre identique au point 1d

Chimie quantitative

| Eléments | % | % | Calculs de |
|----------|--------------------|----------|-------------|
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | | structurale |
| Са | 19,68 | 9,24 | 1 |
| Mg | 12,14 | 9,40 | 1 |
| Si | 29,37 | 19,68 | 2 |
| Al | 2,11 | 1,47 | Traces |
| 0 | 51,18 | 60,21 | 6 |
| Total | 114,48 | 100 | |

Figure 76 : Tableau de chimie quantitative MEB de la lame mince 1, échantillon CD9, point 2d

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $CaMgSi_2O_6$ avec des traces d'aluminium. Elle est compatible avec la formule chimique du <u>diopside</u> dont la formule est $CaMgSi_2O_6$



4.2.3.3. Point 3 ; Lame mince 1 provenant de l'échantillon CD9

Figure 77 : MEB de la lame mince 1, échantillon CD9, point 3 (BSE)

La matrice qui parait homogène à l'œil (Figure 45) ainsi qu'au microscope apparaît au MEB formée de deux minéraux différents ; l'un est gris foncé, l'autre est gris clair.

Lame mince 1, échantillon CD9, point 3a

Spectre

Spectre identique au point 2a.

Chimie quantitative

| Eléments | % | % | Calculs de |
|----------|--------------------|----------|-------------|
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | | structurale |
| Ca | 2,34 | 1,14 | Regroupé |
| | | | avec Na |
| S | 4,17 | 2,54 | 1 |
| Na | 14,55 | 12,38 | 5 |
| Κ | 0,84 | 0,42 | Traces |
| Si | 18,1 | 12,6 | 5 |
| Al | 16,65 | 12,07 | 5 |
| Cl | 0,44 | 0,24 | Traces |
| 0 | 47,94 | 58,6 | 23 |
| Total | 105,03 | 99,99 | |

Figure 78 : Tableau de chimie quantitative MEB de la lame mince 1, échantillon CD9, point 3a

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $(Na,Ca)_5Al_5Si_5O_{23}S$ avec des traces de chlore et de potassium.

Elle est compatible avec la formule chimique d'un minéral du groupe de la sodalite ; la <u>haüyne</u> $(Na,Ca)_{4-8}Al_6Si_6(O,S)_{24}(SO_4,Cl)_{1-2}$

Lame mince 1, échantillon CD9, point 3b

Spectre Spectre

Spectre identique au point 1b.

Chimie quantitative

| Eléments | % | % | Calculs de |
|----------|--------------------|----------|-------------|
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | | structurale |
| Ca | 0,36 | 0,16 | Traces |
| S | 0,67 | 0,38 | Traces |
| Na | 19,18 | 15,05 | 4 |
| Κ | 0,07 | 0,03 | Traces |
| Si | 20,11 | 12,92 | 3 |
| Al | 19,08 | 12,76 | 3 |
| Cl | 6,41 | 3,26 | 1 |
| 0 | 49,16 | 55,44 | 17 |
| Total | 115,04 | 100 | |

Figure 79 : Tableau de chimie quantitative MEB de la lame mince 1, échantillon CD9, point 3b

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $Na_4Al_3Si_3O_{17}Cl$ avec des traces de calcium, de soufre, de potassium.

Elle est compatible avec la formule chimique de la <u>sodalite</u> dont la formule est $Na_8Al_6Si_6O_{24}Cl_2$ ou $Na_4Al_3(SiO_4)_3Cl$ suivant les auteurs.

Lame mince 1, échantillon CD9, point 3c

Spectre

Spectre identique au point 2a.

Chimie quantitative

| Eléments | % | % | Calculs de |
|----------|--------------------|----------|-------------|
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | | structurale |
| Ca | 2,57 | 1,23 | Regroupé |
| | | | avec Na |
| S | 4,49 | 2,68 | 1 |
| Na | 14,84 | 12,36 | 4-5 |
| Κ | 0,80 | 0,39 | Traces |
| Si | 18,38 | 12,53 | 4-5 |
| Al | 16,78 | 11,91 | 4 |
| Cl | 0,42 | 0,23 | Traces |
| 0 | 49,04 | 58,68 | 21 |
| Total | 107.32 | 100,01 | |

Figure 80 : Tableau de chimie quantitative MEB de la lame mince 1, échantillon CD9, point 3c

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $(Na,Ca)5Al_4Si_5O_{21}S$ avec des traces de chlore et de potassium.

Elle est compatible avec la formule chimique d'un minéral du groupe de la sodalite ; la <u>haüyne</u> $(Na,Ca)_{4-8}Al_6Si_6(O,S)_{24}(SO_4,Cl)_{1-2}$

Lame mince 1, échantillon CD9, point 3d

Spectre

Spectre identique au point 1b.

Chimie quantitative

| Elámonta | 0/ | 0/ | Calaula da |
|----------|--------------------|------------|-------------|
| Elements | % 0 | % 0 | Calculs de |
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | | structurale |
| Ca | 0,24 | 0,11 | Traces |
| S | 0,64 | 0,36 | Traces |
| Na | 19,63 | 15,54 | 5 |
| K | 0,04 | 0,02 | Traces |
| Si | 19,52 | 12,65 | 4 |
| Al | 18,98 | 12,81 | 4 |
| Cl | 6,52 | 3,35 | 1 |
| 0 | 48,48 | 55,16 | 18 |
| Total | 114,05 | 100 | |

Figure 81 : Tableau de chimie quantitative MEB de la lame mince 1, échantillon CD9, point 3d

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $Na_5Al_4Si_4O_{18}Cl$ avec des traces de calcium, de soufre et de potassium.

Elle est compatible avec la formule chimique de la <u>sodalite</u> dont la formule est $Na_8Al_6Si_6O_{24}Cl_2$ ou $Na_4Al_3(SiO_4)_3Cl$ suivant les auteurs.

Lame mince 1, échantillon CD9, point 3e

Spectre

Spectre identique au point 2a.

Chimie quantitative

| Eléments | % | % | Calculs de |
|----------|--------------------|----------|-------------|
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | | structurale |
| Ca | 1,98 | 0,94 | Regroupé |
| | | | avec Na |
| S | 3,48 | 2,08 | 1 |
| Na | 16,58 | 13,79 | 7 |
| Κ | 0,11 | 0,05 | Traces |
| Si | 18,75 | 12,76 | 6 |
| Al | 17,05 | 12,08 | 6 |
| Cl | 0,69 | 0,37 | Traces |
| 0 | 48,47 | 57,92 | 29 |
| Total | 107,11 | 99,99 | |

Figure 82 : Tableau de chimie quantitative MEB de la lame mince 1, échantillon CD9, point 3e

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $(Na,Ca)_7Al_6Si_6O_{29}S$ avec des traces de chlore et de potassium.

Elle est compatible avec la formule chimique d'un minéral du groupe de la sodalite ; la <u>haüyne</u> $(Na,Ca)_{4-8}Al_6Si_6(O,S)_{24}(SO_4,Cl)_{1-2}$

| Lame mi échantill CD9 | ince1 on | Microscope Polarisé | Raman | MEB | Minéral |
|-----------------------------|------------------|---|--|--|---|
| Point 1 | 1a | Elément losangique Polarisation de second ordre Fort relief | 234 , 665 , 816, 1068, 1096 Edénite | Na Ca ₂ Mg ₅ Si ₇ Al ₂ O ₂₅ | Edénite NaCa ₂ Mg ₅ Si ₇ AlO ₂₂ (OH) ₂ |
| | 1b | Noyau noir = Isotrope | 430 , 548 , 638, 816, 980 , 1085-1102 Haüyne | Na ₄ Al ₃ Si ₃ O ₁₅ Cl | Sodalite Na ₄ Al ₃ (SiO ₄) ₃ Cl |
| | 1c | Matrice noire = Isotrope | 424 , 545 , 808, 978 , 1090 Haüyne | Na ₄ Al ₃ Si ₃ O ₁₆ Cl | Sodalite Na ₄ Al ₃ (SiO ₄) ₃ Cl |
| | 1d | Petit cristal arrondi avec irisation du rose au vert | 326, 393, 663, 1011 Diopside | CaMgSi ₂ O ₆ | Diopside CaMgSi ₂ O ₆ |
| Point 2 | 2a | Noir = Isotrope | 243, 427, 547, 983, 1093 Haüvne | (Na,Ca) ₅ Al ₅ Si ₅ O ₂₂ S | Haüyne (Na,Ca) ₄₋ ₈ Al ₆ Si ₆ (O,S) ₂₄ (SO ₄ ,Cl) ₁₋₂ |
| | 2b | Gris foncé | 392, 462 , 567, 1090 Néphéline | (Na,K)AlSiO ₄ | Néphéline (Na.K)AlSiO₄ |
| | 2c | Petits éléments longilignes orientés multicolores | 463, 668, 1012 Sodalite + Diopside | Na ₄ Al ₃ Si ₃ O ₁₆ Cl | Sodalite Na ₄ Al ₃ (SiO ₄) ₃ Cl |
| | 2d | Matrice gris moyen et gris foncé | 463, 665, 984, 1010 Sodalite + Diopside | CaMgSi ₂ O ₆ | Diopside CaMgSi ₂ O ₆ |
| | 2e | Gris bleu vert foncé | 142, 327, 391, 667, 854, 1012 , 1046 Diopside + minéral | - | - |
| | 2f | Macles lamellaires de couleur sombre | 149, 282, 714, 1085 Calcite | - | Calcite CaCO ₃ |
| Point 3 | 3a | Matrice (gris foncé au MEB) | - | (Na,Ca) ₅ Al ₅ Si ₅ O ₂₃ S | Haüyne (Na,Ca) ₄₋ ₈ Al ₆ Si ₆ (O,S) ₂₄ (SO ₄ ,Cl) ₁₋₂ |
| | 3b | Matrice (gris clair au MEB) | - | Na ₄ Al ₃ Si ₃ O ₁₇ Cl | Sodalite Na ₄ Al ₃ (SiO ₄) ₃ Cl |
| | 3c | Matrice (gris foncé au MEB) | - | (Na,Ca)5Al ₄ Si ₅ O ₂₁ S | Haüyne (Na,Ca) ₄₋ ₈ Al ₆ Si ₆ (O,S) ₂₄ (SO ₄ ,Cl) ₁₋₂ |
| | 3d | Matrice (gris clair au MEB) | - | Na ₅ Al ₄ Si ₄ O ₁₈ Cl | Sodalite Na ₄ Al ₃ (SiO ₄) ₃ Cl |
| | 3e | Inclusion dans éléments arrondis | - | (Na,Ca) ₇ Al ₆ Si ₆ O ₂₉ S | Haüyne (Na,Ca) ₄₋ ₈ Al ₆ Si ₆ (O,S) ₂₄ (SO ₄ ,Cl) ₁₋₂ |
| | 3f | Elément vert veiné de noir irisé sur les bords | 320, 391, 666, 1010 Diopside | - | Diopside |
| | 3g | Macles lamellaires | 153, 280, 693, 1085 Calcite | - | Calcite |
| | 3h | Elément vert canard veiné de blanc | Spectroscopie exploratoire Diopside | - | Diopside |
| | 3i | Elément noir = isotrope, veiné de blanc | 261, 295, 464, 985 Sodalite | - | Sodalite |
| | 3ј | Matrice noire = isotrope | 321, 393, 665, 1011 Diopside | - | Diopside |
| | 3k | Matrice grise | 255 , 327 , 393 , 429 , 550 , 582, 666 , 982 1012 , 1094 Diopside + Haüyne | - | Diopside + Haüyne |
| | 31 | Elément jaunâtre | 323, 395, 663, 1012 Diopside | - | Diopside |
| | 3m | Elément jaunâtre | 281 , 324 , 392 , 666 , 712 , 1012 , 1085 Calcite + Diopside | - | Calcite + Diopside |
| | 3n, 3o, 3p | Matrice de différents niveaux de gris | 543 , 801, 989 , 1102 , 1606 Haüyne | - | Найупе |

4.2.4. Tableau comparatif des résultats

4.3. Lien entre composition chimique et couleur de l'échantillon

Puisque c'est la couleur de cette roche qui a attiré notre attention sur le marché de Bogyoke, nous décidons d'étudier par quelques passages au MEB le lien entre composition chimique et couleur. Les résultats seront résumés dans un tableau synoptique à la fin de l'étude.

4.3.1. Echantillon CD1 point 1

Etudions au MEB le point 1 de couleur blanche.



Figure 83 : Photo de l'échantillon CD1 montrant la localisation et la couleur du point 1 à étudier



Figure 84 : Photo MEB (Back- Scattered Electrons, BSE/électrons rétrodiffusés) de l'échantillon CD1 point 1

Le point 1 (Figure 71) apparait constitué de cinq éléments de teintes différentes en électrons rétrodiffusés ; un clair (a), un intermédiaire (b) un foncé (c) un plus foncé (d) et un très clair (e). Nous devons donc les étudier séparément.

CD1 Point 1a

Chimie quantitative

| Eléments | % | % | Calculs de |
|----------|--------------------|----------|-------------|
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | | structurale |
| Ca | 38,03 | 25,37 | 5 |
| Р | 16,30 | 14,07 | 3 |
| 0 | 36 ,24 | 60,56 | 13 |
| Total | 90,57 | 100,00 | |

Figure 85 : Tableau de chimie quantitative MEB de l'échantillon CD1, point 1

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : Ca5(PO4)3. Elle est compatible avec la formule chimique de l'**apatite**.

CD1 Point 1b

Chimie quantitative

| Eléments | % | % | Calculs de |
|----------|--------------------|----------|-------------|
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | | structurale |
| Ca | 37 ,63 | 16,19 | 1 |
| Mg | 0,65 | 0,46 | Traces |
| 0 | 56,69 | 61,11 | 3 |
| С | 14,01 | 22,23 | 1 |
| Total | 110,45 | 99,99 | |

Figure 86 : Tableau de chimie quantitative MEB de l'échantillon CD1, point 1b

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $CaCO_3$ avec des traces de magnésium. Elle est compatible avec la formule chimique de la <u>calcite</u>.

CD1 Point 1 c

Chimie quantitative

| Eléments | % | % | Calculs de |
|----------|--------------------|----------|-------------|
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | | structurale |
| Ca | 1,27 | 0,69 | Regroupé |
| | | | avec Na |
| 0 | 42,24 | 57,48 | 26 |
| Na | 12,11 | 11,47 | 5 |
| Al | 15,59 | 12,58 | 6 |
| Si | 20,03 | 15,52 | 7 |
| Cl | 3,67 | 2,25 | 1 |
| Total | 94,91 | 99,99 | |

Figure 87 : Tableau de chimie quantitative MEB de l'échantillon CD1, point 1c

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $(Na,Ca)_5Al_6Si_7O_{26}Cl$ avec des traces de calcium.

Elle est compatible avec la formule chimique d'un minéral du groupe de la sodalite : la <u>haüyne</u> $(Na,Ca)_{4-8}[Al_6Si_6(O,S)_{24}](SO_4,Cl)_{1-2}$

CD1 Point 1d

Chimie quantitative

| | • | | |
|----------|--------------------|----------|-------------|
| Eléments | % | % | Calculs de |
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | _ | structurale |
| Са | 1,17 | 0,62 | Regroupé |
| | | | avec Na |
| 0 | 42,31 | 56,5 | 20 |
| Na | 14,07 | 13,08 | 5 |
| Al | 15,33 | 12,14 | 4 |
| Si | 19,53 | 14,85 | 5 |
| Cl | 4,65 | 2,80 | 1 |
| Total | 97,06 | 99,99 | |

Figure 88 : Tableau de chimie quantitative MEB de l'échantillon CD1, point 1d

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $(Na,Ca)_5Al_4Si_5O_{20}Cl$ avec des traces de calcium.

Elle est compatible avec la formule chimique d'un minéral du groupe de la sodalite : la <u>haüyne</u> $(Na,Ca)_{4-8}[Al_6Si_6(O,S)_{24}](SO_4,Cl)_{1-2}$

CD1 Point 1e

Chimie quantitative

| Eléments | % | % | Calculs de |
|----------|-----------|----------|-------------|
| | Poids des | atomique | la formule |
| | éléments | | structurale |
| Fe | 7,93 | 7,22 | 1 |
| S | 32,21 | 51,11 | 7 |
| Cd | 2,63 | 1,19 | Traces |
| Zn | 52,02 | 40,48 | 6 |
| Total | 94,79 | 100,00 | |

Figure 89 : Tableau de chimie quantitative MEB de l'échantillon CD1, point 1e

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : Zn_6S_7Fe avec des traces de cadmium. Elle est compatible avec la formule chimique de la <u>sphalérite</u> (Zn,Fe)S. C'est le minerai de zinc.

4.3.2. Echantillon CD1 point 2

Etudions au MEB le point 2 de couleur Verte.



Figure 90 : Photo de l'échantillon CD1 montrant la localisation et la couleur du point 2 à étudier



Figure 91 : Photo MEB (BSE) de l'échantillon CD1 point 2

Le point 2 apparait constitué de quatre éléments de teintes différentes en électrons rétrodiffusés ; un clair (a), un foncé (b) un intermédiaire (c) et un plus foncé (d). Nous devons donc les étudier séparément.

CD1 Point 2 a

Chimie quantitative et résultats

Chimie et résultats identiques au point 1b : Calcite.

CD1 Point 2 b

Chimie quantitative

| Eléments | % | % | Calculs de |
|----------|--------------------|----------|-------------|
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | | structurale |
| Ca | 2,17 | 1,34 | Regroupé |
| | | | avec Na |
| 0 | 38,58 | 59,46 | 27 |
| Al | 13,16 | 12,03 | 5 |
| Si | 15,90 | 13,96 | 6 |
| S | 2,89 | 2,22 | 1 |
| K | 0,78 | 0,49 | Traces |
| Na | 9,80 | 10,51 | 5 |
| Total | 83,28 | 100,01 | |

Figure 92 Tableau de chimie quantitative MEB de l'échantillon CD1, point 2b

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $(Na,Ca)_5Si_6Al_5O_{23}SO_4$ avec des traces de calcium et de potassium.

Elle est compatible avec la formule chimique d'un minéral du groupe de la sodalite : la <u>haüyne</u> $(Na,Ca)_{4-8}Al_6Si_6(O,S)_{24}(SO_4,Cl)_{1-2}$

CD1 Point 2 c

Chimie quantitative

| Eléments | % | % atomique | Calculs de |
|----------|-----------|------------|-------------|
| | Poids des | | la formule |
| | éléments | | structurale |
| Ca | 8,94 | 5,20 | 2 |
| 0 | 40,60 | 59,14 | 22 |
| Al | 5,41 | 4,67 | 2 |
| Si | 20,86 | 17,31 | 6 |
| Na | 2,66 | 2,70 | 1 |
| Mg | 11,45 | 10,98 | 4 |
| Total | 89,92 | 100,00 | |

Figure 93 : Tableau de chimie quantitative MEB de l'échantillon CD1, point 2c

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : Na Ca₂ Mg₄ Al₂ Si₆ O₂₂ Elle est compatible avec la formule chimique de l'<u>édénite</u> NaCa₂Mg₅Si₇AlO₂₂(OH)₂ mais aussi avec la formule chimique de la <u>pargasite</u> Na Ca₂(Mg,Fe²⁺)₄Al(Si₆Al₂)O₂₂(OH)₂.

CD1 Point 2 d

Chimie quantitative

| Eléments | % | % atomique | Calculs de |
|----------|--------------------|------------|-------------|
| | Poids des éléments | | la formule |
| | | | structurale |
| Ca | 2,01 | 0,69 | Traces |
| 0 | 75,96 | 65,04 | 8 |
| Al | 15,37 | 7,80 | 1 |
| Si | 18,77 | 9,15 | 1 |
| Mg | 0,53 | 0,30 | Traces |
| С | 14,92 | 17,02 | 2 |
| Total | 127,56 | 100,00 | |

Figure 94 : Tableau de chimie quantitative MEB de l'échantillon CD1, point 2d

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $AlSiC_2O_8$ avec des traces de magnésium et de calcium. Elle correspond à un élément carboné et ne correspond à aucun minéral connu. Elle pourrait être un mélange de plusieurs minéraux.

4.3.3. Echantillon CD1 point 3

Etudions au MEB le point 3 de couleur : bleu foncé.



Figure 95 : Photo de l'échantillon CD1 montrant la localisation et la couleur du point 3 à étudier



Figure 96 : Photo MEB (BSE) de l'échantillon CD1 point 3

Le point 3 apparait constitué de deux éléments de teintes différentes en électrons rétrodiffusés ; un clair et un foncé. Nous devons donc les étudier séparément.

CD1 Point 3 clair

Chimie quantitative

| Eléments | % | % atomique | Calculs de |
|----------|--------------------|------------|-------------|
| | Poids des éléments | | la formule |
| | | | structurale |
| Ca | 15,58 | 10,07 | 1 |
| 0 | 37,25 | 60,32 | 7 |
| Mg | 8,09 | 8,62 | 1 |
| Si | 21,94 | 20,24 | 2 |
| Al | 0,79 | 0,76 | |
| Total | 83,65 | 100,01 | |

Figure 97 : Tableau de chimie quantitative MEB de l'échantillon CD1, point 3 clair

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $CaMgSi_2O_6$ avec des traces d'aluminium. Elle est compatible avec la formule chimique du <u>diopside</u> dont la formule est $CaMgSi_2O_6$.

CD1 Point 3 foncé

Chimie quantitative

| Eléments | % | % | Calculs de |
|----------|--------------------|----------|-------------|
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | | structurale |
| Ca | 1,99 | 1,32 | Regroupé |
| | | | avec Na |
| 0 | 35,75 | 59,40 | 19 |
| Na | 10,07 | 11,64 | 4 |
| Si | 13,61 | 12,88 | 4 |
| Al | 11,39 | 11,22 | 4 |
| Κ | 0,58 | 0,39 | Traces |
| S | 3,80 | 3,15 | 1 |
| Total | 77,19 | 100,00 | |

Figure 98 : Tableau de chimie quantitative MEB de l'échantillon CD1, point 3 foncé

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : (Na,Ca)₄Si₄Al₄O₁₅SO₄ avec des traces de potassium.

Elle est compatible avec la formule chimique d'un minéral du groupe de la sodalite : la <u>haüyne</u> $(Na,Ca)_{4-8}Al_6Si_6(O,S)_{24}(SO_4,Cl)_{1-2}$

4.3.4. Echantillon CD1 point 4

Etudions au MEB le point 4 de couleur ; vert foncé.



Figure 99 : Photo de l'échantillon CD1 montrant la localisation et la couleur du point 4 à étudier



Figure 100 : Photo MEB (BSE) de l'échantillon CD1 point 4

Le point 4 apparait constitué de deux éléments de teintes différentes en électrons rétrodiffusés ; une matrice foncée et des éléments clairs en vermicelles. Nous devons donc les étudier séparément.
CD1 Point 4 foncé

Chimie quantitative

| Eléments | % | % atomique | Calculs de |
|----------|--------------------|------------|-------------|
| | Poids des éléments | | la formule |
| | | | structurale |
| Ca | 1,51 | 0,96 | Regroupé |
| | | | avec Na |
| 0 | 36,88 | 59,01 | 22 |
| Na | 10,94 | 12,18 | 4 |
| Si | 14,45 | 13,17 | 5 |
| Al | 12,13 | 11,51 | 4 |
| Κ | 0,69 | 0,45 | Traces |
| S | 3,39 | 2,71 | 1 |
| Total | 79,99 | 99,99 | |

Figure 101 : Tableau de chimie quantitative MEB de l'échantillon CD1, point 4 foncé

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $(Na,Ca)_4Si_5Al_4O_{18}SO_4$ avec des traces de potassium.

Elle est compatible avec la formule chimique d'un minéral du groupe de la sodalite : la <u>haüyne</u> $(Na,Ca)_{4-8}Al_6Si_6(O,S)_{24}(SO_4,Cl)_{1-2}$

CD1 Point 4 clair

Chimie quantitative

| Eléments | % | % | Calculs de |
|----------|--------------------|----------|-------------|
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | | structurale |
| Ca | 16,19 | 9,80 | 1 |
| 0 | 39,67 | 60,17 | 8 |
| Mg | 7,89 | 7,88 | 1 |
| Si | 23,13 | 19,98 | 2 |
| Al | 1,59 | 1,43 | Traces |
| Na | 0,71 | 0,75 | Traces |
| Total | 89,18 | 100,01 | |

Figure 102 : Tableau de chimie quantitative MEB de l'échantillon CD1, point 4 clair

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $CaMgSi_2O_8$ avec des traces d'aluminium. Elle est compatible avec la formule chimique du <u>diopside</u> dont la formule générale est $CaMgSi_2O_6$.

4.3.5. Echantillon CD1 point 5

Etudions au MEB le point 5 de couleur blanche.



Figure 103 : Photo de l'échantillon CD1 montrant la localisation et la couleur du point 5 à étudier



Figure 104 : Photo MEB (BSE) de l'échantillon CD1 point 5

Le point 5 apparait constitué de deux éléments de teintes différentes en électrons rétrodiffusés ; un clair et un foncé. Nous devons donc les étudier séparément.

Les deux zones rectangulaires ; l'une dans la partie claire, l'autre dans la partie foncée, représentent les zones étudiées au MEB que le passage des électrons a microscopiquement tranformées.

CD1 point 5 clair

| Chimie | q | uantitative |
|--------|---|-------------|
| - | - | |

| Eléments | % | % | Calculs de |
|----------|--------------------|----------|-------------|
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | | structurale |
| Si | 25,4 | 19,88 | 2 |
| Al | 1,22 | 0,99 | Traces |
| Mg | 10,31 | 9,33 | 1 |
| Na | 0,41 | 0,39 | Traces |
| Ca | 1673 | 9,18 | 1 |
| S | 0,10 | 0,07 | Traces |
| 0 | 43,78 | 60,16 | 6 |
| Total | 97,95 | 100,00 | |

Figure 105 : Tableau de chimie quantitative MEB de l'échantillon CD1, point 5 clair

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $CaMgSi_2O_6$ avec des traces d'aluminium. Elle est compatible avec la formule chimique du <u>diopside</u> dont la formule est $CaMgSi_2O_6$.

CD1 point 5 foncé

Chimie quantitative

| Eléments | % | % | Calculs de |
|----------|--------------------|----------|-------------|
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | | structurale |
| Si | 16,53 | 12,85 | 4 |
| Al | 15,77 | 12,77 | 4 |
| Mg | 0,51 | 0,46 | Traces |
| Na | 15,42 | 14,65 | 4 |
| Ca | 0,38 | 0,21 | Traces |
| S | 0,42 | 0,29 | Traces |
| Κ | 0,15 | 0,08 | Traces |
| Cl | 5,35 | 3,30 | 1 |
| 0 | 40,58 | 55,39 | 17 |
| Total | 95,11 | 100,00 | |

Figure 106 : Tableau de chimie quantitative MEB de l'échantillon CD1, point 5 foncé

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $Na_4Al_4Si_4O_{17}Cl$ avec des traces de calcium, de magnésium et de soufre.

Elle est compatible avec la formule chimique de la <u>sodalite</u> dont la formule est $Na_8Al_6Si_6O_{24}Cl_2$ ou $Na_4Al_3(SiO_4)_3Cl$ suivant les auteurs.

4.3.6. Echantillon CD1 point 6

Etudions au MEB le point 6 de couleur : bleu clair.



Figure 107 : Photo de l'échantillon CD1 montrant la localisation et la couleur du point 6 à étudier



Figure 108 : Photo MEB (BSE) de l'échantillon CD1 point 6

Le point 6 apparait constitué de trois éléments de teintes différentes en électrons rétrodiffusées ; un clair, un intermédiaire et un foncé. Nous devons donc les étudier séparément. Lors du premier passage au MEB nous avons étudié seulement deux zones ; une zone claire et une zone à cheval sur l'intermédiaire et la foncée (voir les rectangles sur la photo MEB).

CD1 point 6 intermédiaire/foncé

| Eléments | % | % | Calculs de |
|----------|--------------------|----------|-------------|
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | | structurale |
| Si | 18,98 | 14,33 | 1 |
| Al | 16,83 | 13,23 | 1 |
| Mg | 0,63 | 0,55 | Traces |
| Na | 12,19 | 11,24 | 1 |
| Ca | 1,23 | 0,65 | Traces |
| S | 1,37 | 0,91 | Traces |
| Κ | 1,31 | 0,71 | Regroupé |
| | | | avec Na |
| 0 | 44,06 | 58,39 | 5 |
| Total | 96,60 | 100,01 | |

Chimie quantitative

Figure 109 : Tableau de chimie quantitative MEB de l'éhantillon CD1, point 6 intermédiaire/foncé

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : NaAlSiO₄ avec des traces de magnésium, calcium et souffre et potassium. Elle est compatible avec la formule chimique de la **<u>néphéline</u>** (Na,K) Al SiO₄.

Compte tenu de la photo et des minéraux en traces importants, on pourrait aussi considérer qu'il y a deux phases ou deux minéraux différents.

CD1 point 6 clair

Chimie quantitative

| | | | 1 |
|----------|--------------------|----------|-------------|
| Eléments | % | % | Calculs de |
| | Poids des éléments | atomique | la formule |
| | | _ | structurale |
| Si | 25,23 | 19,78 | 2 |
| Al | 1,63 | 1,33 | - |
| Mg | 10,35 | 9,38 | 1 |
| Na | 0,51 | 0,49 | Traces |
| Ca | 16,21 | 8,91 | 1 |
| S | 0,02 | 0,01 | |
| 0 | 43,68 | 60,12 | 9 |
| Total | 97,63 | 100,02 | |

Figure 110 : Tableau de chimie quantitative MEB de l'échantillon CD1, point 6 clair

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : $CaMgSi_2O_9$ avec des traces d'aluminium. Elle est compatible avec la formule chimique du <u>diopside</u> dont la formule est $CaMgSi_2O_6$.

4.3.7. Echantillon CD1 point 7

Etudions au MEB le point 7 de couleur : gris translucide.



Figure 111 : Photo de l'échantillon CD1 montrant la localisation du point 7 à étudier

Le point 7 est de couleur grise translucide à l'œil.



Figure 112 : Photo MEB (BSE) de l'échantillon CD1 point 7

Le point 7 apparait constitué de deux éléments de teintes différentes en électrons rétrodiffusés; un clair et un foncé en haut de l'image. Nous devons donc les étudier séparément.

CD1 point 7 clair

Chimie quantitative

| Eléments | % | % atomique | Calculs de |
|----------|--------------------|------------|-------------|
| | Poids des éléments | | la formule |
| | | | structurale |
| Ca | 36,72 | 17,06 | 1 |
| 0 | 52,41 | 60,99 | 3 |
| С | 14,17 | 21,97 | 1 |
| Total | 103,30 | 100,02 | |

Figure 113 : Tableau de chimie quantitative MEB de l'échantillon CD1 point 7 clair

<u>Résultats</u>

Résultats identiques au point 1 b et 2 a ; calcite

CD1 point 7 Foncé

Chimie quantitative

| Eléments | % | % atomique | Calculs de |
|----------|--------------------|------------|-------------|
| | Poids des éléments | | la formule |
| | | | structurale |
| Na | 14,26 | 14,99 | 4 |
| 0 | 36,74 | 55,48 | 15 |
| Al | 13,52 | 12,11 | 3 |
| Si | 15,68 | 13,49 | 4 |
| Cl | 5,25 | 3,58 | 1 |
| S | 0,46 | 0,35 | Traces |
| Total | 85 91 | 100.00 | |

Figure 114 : Tableau de chimie quantitative MEB de l'échantillon CD1 point 7 foncé

<u>Résultats</u>

La formule chimique correspondante à l'analyse ci-dessus est : Na₄Al₃Si₄O₁₅Cl avec des traces de calcium.

Elle est compatible avec la formule chimique de la <u>Sodalite</u> dont la formule est $Na_8Al_6Si_6O_{24}Cl_2$ ou $Na_4Al_3(SiO_4)_3Cl$ suivant les auteurs.

4.3.8. Récapitulatif des résultats du MEB

Résumons les résultats précédents dans un tableau.

| Echantillon | Couleur | Couleur sur | Variété/ | Abondance | Couleurs possibles du | Minéral |
|-------------|------------------|-------------------------|--|------------------------------|--|-----------------------|
| CDI | | photo MEB | formule chimique | dans la zone photographié | minéral | donnant la couleur |
| CD1 point 1 | Blanc | Clair (a) | Apatite Ca ₅ (PO ₄) ₃ | Moyenne | Incolore , jaune, bleue, verte, violette, rouge, brun-rouge | * |
| | | Intermédiaire (b) | Calcite CaCO ₃ | Importante | Incolore (mais parfois impuretés) | * |
| | | Foncé (c) | Haüyne (Na,Ca) ₄₋₈ Al ₆ Si ₆ (O,S) ₂₄ (SO ₄ ,Cl) ₁ | Importante | Bleue, verte, rouge, jaune, grise, blanche | * |
| | | Plus foncé (d) | $\begin{array}{c} Ha\Billion u\Billion u\Billio$ | Importante | Bleue, verte, rouge, jaune, grise, blanche | * |
| | | Très clair (e) | Sphalerite (Zn,Fe)S | Anecdotique | Marron, jaune, rouge, verte, noire | |
| CD1 point 2 | Vert | Clair (a) | Calcite CaCO ₃ | 50% | Incolore (mais parfois impuretés) | |
| | | Foncé (b) | Haüyne (Na,Ca) ₄₋₈ Al ₆ Si ₆ (O,S) ₂₄ (SO ₄ ,Cl) ₁ | 50% | Bleue, verte, rouge, jaune, grise, blanche | |
| | | Intermédiaire (c) | Edénite ou Pargasite NaCa ₂ Mg ₅ Si ₇ AlO ₂₂ (OH) ₂ | Anecdotique | Incolore, bleu-gris, grise, blanche, vert clair | * |
| | | Très foncé (d) | AlSiC ₂ O ₈ minéral inconnu | Anecdotique | - | |
| CD1 point 3 | Bleu foncé | Clair | Diopside CaMgSi ₂ O ₆ | 50% | Verte, vert-noir, grise, marron, bleue (rare), blanchâtre | |
| | | Foncé | Haüyne (Na,Ca) ₄₋₈ $Al_6Si_6(O,S)_{24}$ (SO ₄ ,Cl) ₁ | 50% | Bleue , verte, rouge, jaune, grise, blanche | * |
| CD1 point 4 | Vert foncé | Foncé | Haüyne (Na,Ca) ₄₋₈ Al ₆ Si ₆ (O,S) ₂₄ (SO ₄ ,Cl) ₁ | 50% | Bleue, verte, rouge, jaune, grise, blanche | |
| | | Clair | Diopside CaMgSi ₂ O ₆ | 50% | Verte, vert foncé, marron, bleue (rare), blanchâtre | * |
| CD1 point 5 | Blanc | Clair | Diopside CaMgSi ₂ O ₆ | 30% | Verte, vert foncé, marron, bleu (rare), blanchâtre | * |
| | | Foncé | Sodalite Na ₄ Al ₃ (SiO ₄) ₃ Cl | 70% | Bleue, grise, jaune, verte, rose, blanche, incolore | * |
| CD1 point 6 | Bleu clair | Clair | Diopside CaMgSi2O ₆ | 30% | verte, vert-noir, blanchâtre, marron, bleue (rare) | * |
| | | Intermédiaire /foncé | Néphéline NaAlSiO ₄ | 70% | Blanche, grise, marron, jaune, verte | |
| CD1 point 7 | Gris translu- | Clair | Calcite CaCO ₃ | Tâche centrale | Incolore (mais parfois impuretés) | * |
| | cide | Foncé | Sodalite Na ₄ Al ₃ (SiO ₄) ₃ Cl | Tâche excentrée | Bleue, grise , jaune, verte, rose, blanche | * |

5. DISCUSSION

5.1. Assemblage minéralogique de la deymierite

Nous examinons ici la pertinence de la présence des minéraux identifiés dans la deymierite compte tenu de la géologie du gisement.

5.1.1. Calcite CaCO₃

La calcite appartient au groupe des carbonates. C'est un minéral primaire principal composant du calcaire. C'est un minéral secondaire (recristallisé) principal composant du marbre (roche métamorphique).

Dans la région de Mogôk les marbres occupent la moitié de la zone minière. Ce sont d'anciens dépôts calcaires sédimentaires de l'ère paléozoïque ayant supportés de fortes pressions et températures lors de la collision continentale indo asiatique qui se sont transformés en marbres. Ces marbres sont composés principalement de calcite recristallisée et parfois de dolomite (Themelis p.54).

On trouve du marbre à diopside à Chaung-gyi. L'analyse d'échantillons par Ted Themelis donne la composition la suivante (Themelis p.59) : **calcite** 85%, diopside 6%, scapolite 3%, forsterite 3%, titanite 2%, quartz 1%.

On trouve des roches calco-silicatées à Chaung-gyi. L'analyse d'échantillons par Ted Themelis donne la composition la suivante (Themelis p.64) : quartz 35%, **calcite** 20%, feldspath (orthoclase et plagioclase) 20%, diopside 10%, scapolite 10%, titanite 3%, minéraux accessoires 2% graphite, zircon, apatite, magnétite.

Les études précédentes ; microscope pétrographique polarisant, MEB, Raman confirment toutes la présence de calcite dans la deymierite. Nous pouvons affirmer que la calcite est un minéral présent dans la roche étudiée. L'examen visuel la deymierite nous montre une proportion de calcite d'environ 20%.

5.1.2. Sodalite Na₈Al₆Si₆O₂₄Cl₂ ou Na₄Al₃(SiO₄)₃Cl

Haüyne (Na,Ca)₄₋₈[Al₆Si₆(O,S)₂₄](SO₄,Cl)₁₋₂

La sodalite est un feldspathoïde, elle se forme donc dans des roches pauvres en silice. La sodalite coexiste avec des silicates de première phase ainsi qu'avec des silicates de seconde phase (néphéline). Dans les roches silicatées on trouve souvent la sodalite autour des grains de diopside.

A Mogôk, la sodalite fait partie des minéraux constitutifs des skarns. A Mogôk les scarns se forment au contact des roches métamorphiques (marbres, roches calco-silicatées, gneiss) et les roches ignées (syénite, pegmatites, leucogranite, microgranite biotite).

A Pyang-yi la sodalite se forme dans la zone de contact du marbre et du leucogranite. Ted Themelis note : « Pyang-gyi (hackmanite, afganite ?, sodalite, andalusite, johachidolite, poudretteite, spinel) » (Themelis p.34).

Les études précédentes ; microscope pétrographique polarisant, MEB, Raman confirment toutes la présence de minéraux de la famille de la sodalite : sodalite, haüyne dans la roche étudiée. Nous pouvons affirmer que des minéraux membres du groupe de la sodalite sont présents dans la roche étudiée. La présence ou non de chlore dans les différentes formules chimiques donnerait à penser que nous sommes en présence de Haüyne qui peut selon les cas soit contenir du chlore ou un groupement SO₄. Nous pourrions donc avoir les deux formules chimiques d'un même minéral présentes en même temps dans une même roche : $(Na)_{4-8} Al_6 Si_6(O)_{24} (SO_4)$ et $(Na)_{4-8} Al_6 Si_6(O)_{24} Cl.$

La haüyne est par ailleurs isotrope et parfois anisotrope ce qui conforterait les résultats au microscope polarisant de la lame mince (Xu H. & Veblen D.R., 1995).

La fluorescence orange sous UV long est compatible avec la haüyne.

De plus il existe une solution solide entre noséane et haüyne qui contient du calcium (Van Peteghem, J.K. and Burley, B.J.,1963). Nous pourrions donc aussi avoir dans la roche étudiée un mélange d'haüyne et de noséane. L'analyse chimique ne montrant que des traces de calcium, la cohabitation noséane-haüyne nous semble peu probable.

Notre roche contient de la sodalite et probablement de la haüyne. L'examen visuel la deymierite nous montre une proportion de sodalite d'environ 23% et d'haüyne de 23%.

5.1.3. Edénite NaCa₂Mg₅Si₇AlO₂₂(OH)₂

Pargasite Na Ca₂(Mg,Fe²⁺)₄Al(Si₆Al₂)O₂₂(OH)_{2.}

L'édénite se forme dans l'environnement riche en sodium et aluminium des pegmatites granitiques et des skarns métamorphiques. On trouve l'édénite en différentes couleurs : vertbleu, gris foncé, marron clair. Les minéraux associés à l'édénite sont la trémolite ; amphibole sans sodium ni aluminium, la biotite ; mica contenant du fluor, les pyroxènes dont le diopside, les spinelles et la calcite.

On trouve de l'édénite en Birmanie dans la mine de Pyant Gyi au nord de Mogök³. La base de données RRUFF possède entre autre come référence le spectre d'une édénite de « Mogôk ». Themelis dan sson ouvrage sur les mines de Mogôk ne fait cependant pas référence à de l'édénite mais à la pargasite dont la formule chimique est la suivante : $NaCa_2(Mg,Fe^{++})_4Al(Si_6Al_2)O_{22}(OH)_2$ C'est une minéral de la même famille que l'édénite que l'on trouve dans les roches de métamorphisme régional de haute température et dans les skarns en contact avec les rochez ignées, dans certaines roches volcaniques et dans les roches ultrabasiques altérées. Themelis note que dans les marbres, la pargasite est de loin plus abondante que le diopside (Themelis p.54).

L'étude au microscope pétrographique polarisant de la lame mince 1 point 1 de l'échantillon CD9 nous a montré les éléments losangiques (1a), typiques d'une amphibole. Certains pics du spectre Raman du point 1a correspondent à ceux de l'édénite (245, 674 cm⁻¹). La formule chimique résultant de l'analyse au MEB de la lame mince de l'échantillon CD9 point 1a et de l'échantillon CD1 point 2c, correspond exactement à la formule chimique de l'édénite. Le lien entre couleur verte et édénite du point 2c de l'échantillon CD1 a été établi. Les modalités habituelles de formation de l'édénite correspondent aux conditions géologiques de la région de Mogôk.

Compte tenu des éléments ci-dessus nous pouvons conclure que l'édénite est le minéral présent dans la roche étudiée. L'examen visuel la deymierite nous montre une proportion d'édénite d'environ 10%. Elle semble être dans notre cas et contrairement à ce que note Themélis moins abondante que le diopside (Themelis p.54).

5.1.4. Diopside CaMgSi₂O₆

Themelis fait référence au diopside dans les skarns de calc-silicates et de microgranite biotite de Pyaung-gaung mais pas à Chaung-gyi (Themelis p.34). Il fait référence au diopside dans les marbres à scapolite, dans les marbres à rubies mélangés à la forstérite, dans les marbres à diopside, titanite et rubies et surtout dans les marbres à diopside.

³ http://www.mindat.org/loc-193876.html

La composition des échantillons provenant des marbres à diopside de Chaung-gyi est la suivante : calcite 85%, **diopside** 6% scapolite 3% forsterite 3%, titanite 2%, quartz 1%.

La composition des échantillons provenant de roches cal-silicatées de Chaung-gyi est la suivante : quartzs 35%, calcite 20%, feldsparth 20%, **diopside** 10%, scapolite 10%, titanite 3% et minéraux accessoires 2% graphite, zircon, apatite, magnétite.

Nous avons rencontré une quantité non négligeable d'aluminium dans le diopside présent dans la roche étudiée. L'aluminium n'est pas un élément de la formule chimique du diopside cependant « L'aluminium entre dans la structure du diopside d'autant plus facilement que la pression de formation est forte » (Deer et al.,1992).

Nous pouvons affirmer que le diopside est présent dans notre roche la roche étudiée. L'examen visuel la deymierite nous montre une proportion de diopside d'environ 20%.

5.1.5. Néphéline (Na,K) Al SiO₄

A Mogôk on trouve la néphéline associée à la syénite ; roche ignée pauvre en silice. On trouve des blocs de syénite en couches près de Mana-Lisu dans la vallée de Chaung-gyi (Themelis p.45). Ted Themelis ne fait pas référence à de la néphéline dans la zone minière de Chaung-gyi même.

On retrouve cependant la néphéline dans l'étude de la lame mince 1 point 2b ainsi que dans l'étude de la relation couleur/chimie dans le point CD1 6 foncé. Nous attribuerons généreusement, à la néphéline après examen visuel une proportion de 4%.

5.1.6. Sphalérite (Zn,Fe)S

La présence de ce minéral à Mogôk est surprenante et inattendue mais pas impossible. Il peut y avoir formation de minerais dans le processus de métasomatisme ou près de la zone de contact. "The formation of important ore minerals may occur by the process of metasomatism at or near the contact zone"⁴. La sphalérite est donc un minéral présent dans la roche étudiée en très faible quantité.

5.1.7. Apatite Ca₅(PO₄)₃

L'apatite est un minéral secondaire que l'on trouve communément dans les roches ignées. Dans la région de Mogôk on trouve l'apatite en faible quantité dans pratiquement toutes les roches ignées présentes : Biotite microgranite, leucogranite, granite augite, diorite, syénite, quartz syénite, syénite hornblende, syénite néphéline, ainsi que dans certaines roches métamorphiques ; marbre pur, marbre diopside, marbre à spinelles, roches calco-silicatées et gneiss.

Dans la région minière de Mogôk les marbres sont souvent intercalés de roches calco-silicatées et pénétrés par des roches ignées. Parfois les marbres sont en contact avec les roches ignées intrusives et forment des skarns et des zones de contact.

On trouve du leucogranite à Chaung-gyi. L'analyse d'échantillons par Ted Themelis donne la composition suivante (Themelis p.43) : orthoclase 45%, quartz 30%, plagioclase 15%, minéraux accessoires 3% spessartite, muscovite, **apatite**, hornblende, titanite, zircon, biotite et magnétite. On trouve aussi du marbre diopside à Chaung-gyi. L'analyse d'échantillons par Ted Themelis

donne la composition la suivante (Themelis p.59) : calcite 85%, diopside 6%, scapolite 3%, fostérite 3%, titanite 2%, quartz 1%. Il n'y a généralement pas d'apatite.

On trouve des roches calco-silicatées à Chaung-gyi. L'analyse d'échantillons par Ted Themelis donne la composition la suivante (Themelis p.64) : quartz 35%, calcite 20%, feldspath (orthoclase et plagioclase) 20%, diopside 10%, scapolite 10%, titanite 3%, minéraux accessoires 2% graphite, zircon, **apatite**, magnétite.

⁴ http://www.allaboutgemstones.com/rock_cycle_metamorphic.html

Nous avons individualisé l'apatite uniquement au passage MEB de l'échantillon CD1 point 1 clair. La couleur blanche du point 1 est compatible avec la couleur de ce minéral. Cependant ce minéral n'apparait pas dans l'analyse de la lame mince. L'apatite est donc un minéral présent dans la roche étudiée en faible quantité.

5.1.7. Origine de la couleur

Les quatre couleurs de notre roche sont la couleur blanche, grise, verte et bleue avec des variations allant du clair au foncé.

La couleur blanche s'explique que si tous minéraux sont blancs. Dans le cas du point 1 de l'échantillon CD1, la couleur blanche vient de la présence de calcite incolore, d'apatite incolore et d'haüyne qui peut être parfois de couleur blanche. Dans le cas du point 5 de l'échantillon CD1 la couleur blanche viendrait du diopside et de la sodalite. C'est surprenant mais pas impossible ; la sodalite peut être blanche et le diopside blanchâtre. Le point 7 est gris translucide ; là aussi, c'est principalement la calcite qui, avec peut être quelques impuretés, donne la couleur mais il existe aussi de la sodalite grise (excentrée).

Les points 3 et 6 sont de couleur bleue. Le premier, bleu foncé, est formé de diopside et de haüyne ; le diopside est rarement bleu, mais ce n'est pas impossible. Il peut être aussi être blanchâtre. C'est donc la haüyne qui donnerait la couleur bleue. Le second est de couleur bleu clair provenant du mélange du diopside et de néphéline. La néphéline est blanche et le diopside, pourtant rarement bleu, semble être, sauf erreur, la seule explication. Quant à la couleur verte des points 2 et 4 elle peut s'expliquer soit par la présence de minéraux verts ou du mélange de minéraux bleus et jaunes. Le point 2 est formé de calcite, d'haüyne et d'édenite qui tous peuvent être verts mais aussi jaune (haüyne ou calcite) et bleus. Toutefois et pour simplifier, la couleur verte du point 2 est probablement due à l'édénite. Le point 4, vert foncé, pourrait être formé d'haüyne jaune ou verte et de diopside bleu ou vert foncé. La couleur verte est probablement due au diopside ; vert par excellence. Nous pourrions être en présence d'une roche contenant de la haüyne et de la calcite de trois couleurs différentes : bleue, jaune, verte et du diopside blanc, vert et/ou bleu ! De manière plus réaliste, car la calcite est rarement colorée et le diopside rarement bleu, notre roche contient de la calcite et de l'apatite incolores, de la haüyne blanche et bleue, du diopside vert et gris-blanchâtre, de l'édénite verte et de la sodalite incolore ou grise.

| Minéraux en présence dans la roche étudiée/ formule chimique | Couleurs possibles | Proportions relatives approximatives |
|---|---|---|
| Calcite | Incolore mais peut prendre différentes couleurs suivant les impuretés | 20% |
| Sodalite | Bleue, grise, jaune, verte, rose, blanche | 23% |
| Haüyne | Bleue, verte, rouge, jaune, grise | 23% |
| Edénite | Incolore, bleu-gris, grise, blanche, vert clair | 10% |
| Diopside | Verte, vert-noir, grise, marron, bleue (rare) | 20% |
| Néphéline | Blanche, grise, marron, jaune, verte | 4% |
| Sphalérite | Marron, jaune, rouge, verte, noire | Anecdotique |
| Apatite | Incolore, jaune, bleue, verte, violette, rouge, brun-rouge | Anecdotique |

5.1.8 Récapitulatif des minéraux en présence

5.2. Pétrologie de la deymierite

La deymiérite est une roche à grains fins essentiellement à diopside et feldspathoïdes (haüyne et sodalite) avec des « globules à gros cristaux » ; des porphyroblastes de calcite et d'édénite.

La chimie est étonnante car nous sommes en présence de magnésium mais pas de fer, de sodium mais pas de potassium.

Son origine pourrait être :

- sédimentaire
- magmatique
- métamorphique

Notre roche n'a ni la texture ni la minéralogie d'une roche sédimentaire.

Si son origine est magmatique, elle vient d'une lave assez spéciale composée de CO₃, Ca, Mg, Na Al, S, Cl, Si.

Le diopside est abondant dans les péridotites mais la présence de feldspathoïdes, typiques de roches sous-saturées très différenciées est contradictoire.

Si elle est métamorphique elle pourrait venir de la recristallisation dans une faille par exemple, de minéraux sédimentaires dissouts par des fluides ; métamorphisme d'évaporite.

Elle pourrait être la conséquence de la métasomatose qui génère souvent des roches à chimie inhabituelle. Dans notre cas les Fe et K sont restés dans une roche mère. Il peut aussi y avoir eu lessivage d'une pile d'évaporite. S et Cl peuvent être des indicateurs d'évaporites ; roche sédimentaires à gypse CaSO₄2H₂O et Na Cl halite plus dolomie (Ca, Mg)CO₃ calcaire.

Les minéraux présents dans notre roche sont quasiment tous d'origine métasomatique provenant de skarns. Nous opterons pour cette possibilité.

Les réactions de contact entre roches ignées et roches carbonatées forment des skarns. Les skarns sont des roches riches en calcium produites par des réactions de contact à haute température entre des solutions fluides contenues dans les roches ignées et les CO₂ contenu dans les roches carbonatées. Les modifications de composition chimique sont importantes car de la silice, du fer, de l'aluminium et du magnésium sont métasomatiquement introduit dans les roches carbonatées.

5.3. Peut-on affirmer que notre roche est originaire de Chaung-gyi?

Non, nous ne pouvons pas affirmer que notre roche est originaire de Chaung-gyi. Il nous faut faire confiance à la personne qui nous a vendu ces échantillons de roche et qui nous en a donné l'origine : Mr Minn Maung Maung.

5.4. Peut-on affirmer que notre roche est une nouvelle roche gemme ?

Notre roche est vendue en quantité non négligeable au marché de Bogyoke à Rangoon comme une roche décorative taillée pour entrer dans la fabrication d'éléments de bijouterie. Nous pouvons donc dire que notre roche est une nouvelle roche gemme

6. CONCLUSION

L'analyse de la roche par les méthodes de laboratoire (Raman, MEB, micro Polarisation) a permis d'identifier les matériaux qui la constituent : matrice à grains fins à diopside et feldspathoïdes (haüyne, sodalite), avec des porphyroblastes à calcite, édenite, diopside et feldspathoïdes.

Nous sommes en présence d'une roche composée de calcium (Ca), magnésium (Mg), sodium (Na), Chlore (Cl), souffre (S), silice (Si), aluminium (Al) ; Chimie qui fait penser à des skarns. Notre roche semble donc être d'origine métasomatique de contact entre roches ignées et roches carbonatées. Les skarns sont des roches riches en calcium produites par des réactions de contact à haute température entre des solutions fluides contenues dans les roches ignées et les CO_2 contenu dans les roches carbonatées. Les modifications de composition chimique sont importantes car de la silice, du fer, de l'aluminium et du magnésium sont métasomatiquement introduits dans les roches carbonatées.

Un matériau d'apparence visuelle différente de couleur bleu intense homogène, translucide, veiné de blanc, mais de composition minéralogique très proche ; haüyne, sodalite, calcite, venant la région de Mogôk a été étudié en 2006 par GemTechLab à Genève (Grobon et Hainschwang, 2006). La roche étudiée dans ce mémoire a des couleurs et une chimie beaucoup plus variées.

Il y a des similitudes avec le lapis lazuli, dans un contexte géologique identique. Nous faisons référence à l'ouvrage de Claire Da Cunha p.69. L'auteur note « nombre de personnes doutent encore de la présence de lapis lazuli en Birmanie ». Elle cite toutefois deux échantillons de roches rencontrées en Birmanie contenant de la lazurite, de la haüyne, de la sodalite, du diopside et de la calcite provenant de la région de Thabapin près de Mogôk. Peut être serait-il enrichissant d'approfondir cette question ?

Il y a eu des tentatives de chauffage du lapis lazuli pour améliorer la couleur bleue avec des résultats variables (da Cunha, 1989, p.83). A partir de ces résultats il serait intéressant de réaliser des expériences de chauffage et de constater l'évolution de la couleur.

Nous avons dans ce mémoire identifié la nature d'un matériau d'importance gémmologique puisqu'il est vendu en quantité non négligeable sur les marchés, en particulier à Rangoon. L'idée amusante de lui proposer le nom de « Deymierite » a été suggéré en début d'étude par mes encadrants. Il apparait qu'une roche métamorphique à diopside et feldspathoïdes n'est pas commune et n'a pas de nom dans la nomenclature des roches métamorphiques. Pourquoi pas la « Deymierite » !

ANNEXES





Annexe 2- Spectre Raman RRUFF Haüyne X060005



Annexe 3-Spectre Raman RRUFF diopside X050059



Annexe 4- Spectre Raman RRUFF néphéline R040025-3



Annexe 5- Spectre Raman RRUFF sodalite R060354



Annexe 6- Spectre Raman RRUFF calcite R04170



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Da Cunha C. (1989) Le lapis lazuli, Edition du Rocher, Monaco, 138 pages.

- Deer W.A., Howie R.A. and Zussman J. (1992) An Introduction to the Rock-forming Minerals, 2nd edition, Longman Scientific and Technical, London, 696 pages.

- Grobon C. Hainschwang T. (2006) Massive Haüyne-Sodalite from Myanmar, *Gem News International*, Spring 2006, pp.64-65.

- Mandarino J.A. (1999) Fleischer's Glossary of Mineral Species, 8th edition, The mineralogical Record Inc, Tucson, 225 pages.

- Themelis T. (2008) Gems & Mines of Mogok, Publié par l'auteur en Thaïlande, 352 pages.

- Van Peteghem, J.K. and Burley, B.J. (1963) Studies on solid solution between sodalite, nosean, and hauyne, The *Canadian Mineralogist*, n°7, pp. 808-813.

- Xu H. Veblen D.R. (1995) Transmission electron microscopy study of optically anisotropic and isotropic Haüyne, *American Mineralogist*, Vol.80, pp. 87-93.

- http://www.aigsthailand.com/Default.aspx

- http://www.google.fr/imgres?imgurl=http://svt.ac-dijon.fr/schemassvt/IMG/classif_streckeisen-501x545.jpg&imgrefurl=http://svt.ac-

dijon.fr/schemassvt/article.php3%3Fid_article%3D135&h=545&w=501&sz=36&tbnid=CWCKs Qh21xRdsM:&tbnh=133&tbnw=122&prev=/images%3Fq%3DStreckeisen&hl=fr&usg=__Of98 aw-ZwebVWXfZK3R1dfTVJTE=&ei=_fUYS8-

tFY794AbDoOT2Ag&sa=X&oi=image_result&resnum=2&ct=image&ved=0CAkQ9QEwAQ

- http://www.mindat.org/loc-193876.html

- http://www.allaboutgemstones.com/rock_cycle_metamorphic.html