

Année 2008

Diplôme d'université de gemmologie

Présenté

**Devant l'université de Nantes
U.F.R. des sciences et techniques**

**Par
M.Patrice Tahiri-Jouti**

Le diopside

**Soutenu publiquement le 06 juin 2008
Au département des Sciences de la Terre et de l'Univers
devant la commission d'examen composée de:**

M.E.FRITSCH	Professeur	Président
M. S. LEFRANT	Professeur	Vice-président
M. J. GIRARDEAU	Professeur	Examineur
M. H. GARCIA-GUILLERMINET	Directeur du Laboratoire français de Gemmologie (LFG)	"
M. F. NOTARI	Directeur, du Gemtechlab	"
M. B. RONDEAU	Maître de conférences	"
M. B. LASNIER	Professeur	Invité

Remerciements :

-Je tiens tout d'abord à remercier M. Fritsch pour l'ensemble de son aide, tant au niveau des cours donnés, mais aussi pour sa contribution dans les analyses effectuées dans ce mémoire et surtout pour les gemmes qu'il m'a prêtées.

-Je remercie M. Lasnier de nous avoir ouvert sa bibliothèque afin que nous puissions trouver les références nécessaires à notre recherche, mais aussi pour ses conseils et sa bonne humeur.

-Je remercie également M. Denis Gravier du fait de sa grande aide pour l'achat de mes gemmes, et de l'envoi rapide de celles-ci.

-Je remercie M. Barreau, ingénieur à l'IMN, pour avoir passé l'ensemble de nos échantillons au microscope électronique à balayage et d'avoir sauvegardé celles-ci sur son ordinateur.

-Je remercie ma mère qui a relu mon mémoire.

-Je remercie enfin ma femme sans laquelle je n'aurais pas été aussi motivé pour écrire le dug et qui m'a soutenu tout le long des différentes étapes.

PLAN

Introduction

I ° Partie: synthèse des différents caractéristiques du diopside

- I.1: définition
- I.2: étymologie
- I.3: conditions de formation, paragenèse
- I.4: structure et cristallisation
- I.5: famille et caractéristiques chimiques
- I.6: caractéristiques optiques et physiques
- I.7: tableau récapitulatif des caractéristiques
- I.8: variétés et différents gisements

II ° Partie: Méthodes

- II.1: Méthodes de gemmologie classique
 - II.1.1 : la balance hydrostatique
 - II.1.2 : le réfractomètre
 - II.1.3 : Le microscope optique
 - II.1.4 : Luminescence et phosphorescence

- II.2: Méthodes de laboratoire
 - II.2.1 : Microscope électronique à balayage
 - II.2.2 : Spectrométrie uv-visible-PIR
 - II.2.3 : Spectrométrie Raman

III ° Partie: les échantillons

- III.1 : présentation des différents échantillons

IV ° Partie : Résultats

- IV.1 : Résultats des méthodes de gemmologie classique
 - IV.1.1 : La densité, indices de réfraction
 - IV.1.2 : Microscope optique
 - IV.1.3 : Luminescence et phosphorescence

- IV.2 : Résultats des méthodes de laboratoire
 - IV.2.1 : Microscope électronique à balayage
 - IV.2.2 : Spectrométrie uv-visible-PIR
 - IV.2.3 : Spectrométrie Raman

V ° Partie : Discussion

VI °Partie : Conclusions

VII ° Partie : Références bibliographiques

Introduction

Le diopside est un minéral de la famille des pyroxènes. Il existe différentes variétés de diopside dont la plus appréciée en tant que gemme est le diopside chromifère grâce à sa couleur vert émeraude due à une teneur en chrome plus élevée. Il y a aussi le diopside « étoilé » appelé aussi « black star » à cause de sa couleur vert foncé, la violane qui est un diopside violet « originellement italien » ; le diopside « classique » variant d'une couleur incolore à un vert bouteille souvent assez clair et enfin le diopside vanadifère découvert en 1992 en Tanzanie, ainsi que d'autres variétés dont on parlera par la suite.

Le diopside est très étudiée en tant que minéral, tandis que la gemme est un peu moins étudiée et cela est sûrement dû à sa « dureté de Mohs » qui n'est que de 5.5 avec un clivage facile ce qui rend cette gemme difficile à tailler et à monter.

On voit donc surtout cette gemme sous forme de cabochon.

Toutes ces raisons ont attisé ma curiosité et m'ont décidé à mieux connaître cette gemme qui possède de nombreuses variétés à laquelle aucune « monographie » n'a été consacré. La couleur généralement verte de la gemme m'a aussi poussé vers ce choix.

Nous allons donc suivre pour ce mémoire le plan suivant:

-une première partie qui sera une synthèse bibliographique sur le diopside, c'est-à-dire faire un résumé complet sur ce qui a été écrit sur la gemme.

-une deuxième partie qui comprendra la description des méthodes qu'on a utilisées pour analyser les différents échantillons. On débutera par la description des méthodes de gemmologie classique (calcul de densité, indices de réfractions, luminescence, microscopie) et puis des méthodes de laboratoire (microscope électronique. Raman, spectrométrie uv-vis-pir...)

- La troisième partie sera consacrée à la présentation des échantillons.
- La quatrième partie sera consacrée aux résultats obtenus lors des analyses.
- Une cinquième partie, enfin relèvera de la discussion.

I ° Partie: Les différentes caractéristiques du diopside

I.1: définition

Gemme d'une couleur souvent verte à l'éclat vitreux, le diopside est une espèce minérale qui fait partie de la famille des pyroxènes, elle fut découverte par R.J.Haüy. Elle a pour formule chimique : $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$, et un système cristallin monoclinique

I.2 Étymologie

R.J.Haüy l'a dénommée ainsi pour sa forte biréfringence qui provoque un sensible phénomène de doublage, des images vues à travers le cristal (de *dis* « deux fois » et de *opsis* « vision » c'est à dire double vision). (Poirot & Bariaud, 1998).

I.3 Conditions de Formation, paragenèse

Les renseignements suivants proviennent de (Bariaud et al., 1977).

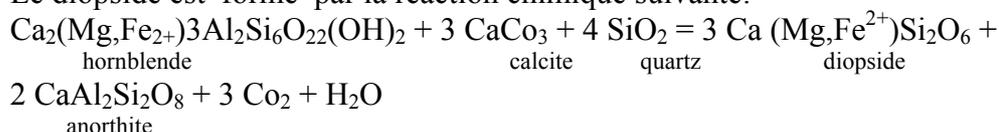
Le diopside est un minéral très commun des roches magmatiques (basaltes par exemple), c'est aussi un minéral constituant la péridotite, roche du manteau terrestre. En plus d'être un minéral magmatique, le diopside sensu stricto apparaît aussi comme un minéral de métamorphisme régional, constituant fréquent des cipolins et surtout du métamorphisme de contact exercé par les roches acides à moyennement acide sur les dolomites: à ce titre, il est constituant des skarns et des tactites (roches métamorphiques du groupe des cornéennes à grain grossier à calcite cristalline, elles prennent le nom de skarn quand elle contiennent des oxydes de fer et des grenats) ou, en paragenèse avec des grenats calciques et la wollastonite, il est lié aux minéralisations à sheelite, molybdénite, chalcopyrite et parfois oxydes de fer. La teneur en fer de ces cristaux augmente généralement avec le degré de métamorphisme.

Le diopside est également un élément fréquent des pegmatoïdes type Madagascar dont l'origine, en fait énygmatisée, est peut être due à l'assimilation d'encaissants magnésiens (pyroxénites) par des intrusions granitiques; il y est associé à la phlogopite, au spinelle et à la scapolite et il est lié aux minéralisations à uranothorianite et thorigummite.

Les diopsides magmatiques sont de teintes plus sombres, ils se rencontrent dans les roches ignées basiques et ultrabasiques : diorites, plus fréquemment gabbros et pyroxénites.

Les renseignements suivants proviennent de (Deer et al., 1992)

Le diopside est formé par la réaction chimique suivante:



Dans les diopsides magmatiques, les substitutions de Cr à Mg et Fe donnent la variété chromdiopside, parfois en grands cristaux d'un beau vert plus ou moins sombre (Finlande, et d'une façon générale dans les gisements de chromite).
On trouve aussi du diopside dans les Kimberlites.

L'omphacite qui est une des variétés du diopside (c'est une variété qui peut contenir jusqu'à 8% de Na₂O contrairement aux autres variétés qui ne dépassent pas 0.5%) est un minéral typique des éclogites.

I.4 Structure et cristallisation

Les renseignements suivants proviennent de (Deer et al., 1992).

La structure cristalline du diopside est celle de tous les pyroxènes, chaînes simples infinies de période 2 de complexes tétraédriques [SiO₄], parallèle à l'axe c (appelé z dans certains cas), liés par Fe et Mg en sites octaédriques et par Ca octocoordonné dans un tétraèdre pyramidé irrégulier proche d'un cube. L'observation de cette structure cristalline perpendiculairement à l'axe fait comprendre le passage du clivage {110} entre les chaînes Si₂O₆.

La période entre les deux tétraèdres est de 0.52 nm. (fig.n°1).

Les autres paramètres du diopsides sont a = 0.975 nm, b = 0.892 nm et Bêta = 105.83°.
(Batty, 1972).

Les sites M1 situés entre les petites bases de 2 trapèzes sont octaédriques tandis que les sites M2, situés entre les deux bases ont une coordination de 6 qui est moins régulière que la précédente. Ces sites sont appelés site octadistordu. (Fig.n°1)
Ainsi la symétrie des pyroxènes va dépendre de la taille des cations occupant le site M2, et dans notre cas vu que le cation Ca est assez volumineux nous aurons une symétrie monoclinique pour le diopside. (Aubouin et Al, 1975).

Le clivage {110} est une caractéristique des pyroxènes, il est dû à des ruptures à l'échelle moléculaire se faisant par isolement des chaînes les unes des autres, chaînes en forme de trapèze qui s'emboîtent pour donner des branches parallèles à b ({100}). Dans un plan perpendiculaire, les traces de ce clivage font entre elles un angle voisin de 90° (87°) qui dans le cas favorable permet de les distinguer des amphiboles pour lesquelles l'angle est de 124°. Dans beaucoup de cas ces clivages ne sont pas continus de telle sorte que l'on observe le plus souvent selon l'allongement, un aspect fibreux, où les angles sont peu distincts ; c'est surtout sur une lame mince que l'observation des clivages est relativement aisée. (Deer et Al, 1992)

La structure du diopside peut changer :

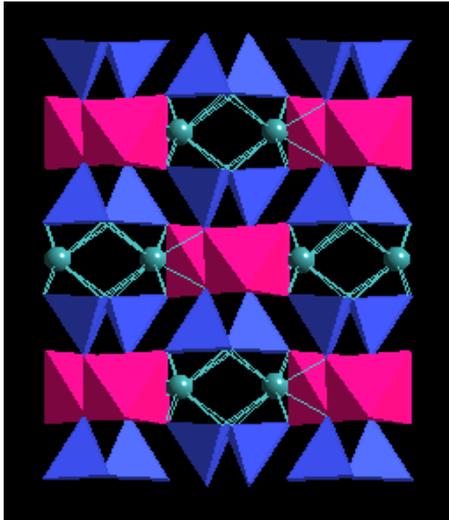
- Si aux ions Mg se substituent d'autres ions (Fe, Cr...).mais ceux-ci ne provoquent que des changements mineurs dans les liaisons Si-O.
- Quand des petits atomes occupent le site M2, cela peut provoquer des déplacements de la chaîne Si-O parallèlement à l'axe c et l'adoption de différents arrangements et donc cela peut changer la structure du diopside.
- Quand le site M1 est occupé par deux groupes de cations avec des 'rayons' très

différents mais en proportion égale, il se produit un déplacement et deux sortes de sites M1 se produisent.

-Un changement de structure peut aussi avoir lieu si des atomes du sites M1 ou M2 sont remplacés par des atomes d'une taille très différente.

Voici une image de la structure d'un diopside :

Figure N°1 : structure du diopside
<http://ruby.colorado.edu/~smyth/min/pyroxene.html>



-les tétraèdres en bleu représentent la liaison Si-O.

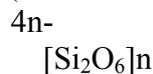
-les tétraèdres en rose représentent les sites M1 (Mg).

-les petites sphères vertes représentent les sites M2 (Ca).

I.5 Famille minéralogique et chimie

Les renseignements suivants proviennent de (Aubouin et al., 1975).

Le diopside est une espèce minérale fait partie de la famille des pyroxènes et plus précisément des clinopyroxènes. Il est constitué de chaînes simples de tétraèdres (SiO₄) chacune d'elles ayant un oxygène en commun avec les deux autres tétraèdres, voisins de part et d'autres. Ces chaînes sont allongées suivant l'axe c et leur période est de deux tétraèdres. (c = 0.52nm) d'où leur formule :



Comme il y a six atomes d'oxygène, la somme totale des valences de cations doit par conséquent être égale à 12. Les chaînes de tétraèdres sont reliées entre elles latéralement par les cations Ca, Mg, Na, Fe, Al... occupant deux sortes de sites M1 et M2. La formule générique des clinopyroxènes est XYSi₂O₆.

Les renseignements suivants proviennent de (Deer et al., 1992).

Le diopside est un clinopyroxène qui contient de 50 à 100% de Ca dans les sites X et Y.

Souvent, des atomes de magnésium sont remplacés par l'ion Fe²⁺ qui donne une couleur vert sombre à brune à la gemme. Si l'ion Fe²⁺ augmente en quantité, la gemme devient d'un vert très sombre, et peut même apparaître noire.

L'ion Fe³⁺ est très souvent présent dans le diopside en quantité non négligeable

(0.25pfu) et ainsi certaines de ces gemmes portent le nom de diopside ferrique.

On trouve aussi l'ion chrome qui est caractéristique du diopside des roches métabasiques et basiques. Ces minéraux contiennent des solutions non négligeables de $\text{NaCrSi}_2\text{O}_6$ (kosmochlor) et du CaCrAlSiO_6 ; la couleur verte du diopside apparaît plus lumineuse et plus claire, celui-ci est appelé diopside chromifère.

L'ion manganèse apparaît aussi mais sa teneur est très faible (elle est inférieure à 0.25 wt).

Plus le fer est présent dans le diopside plus la quantité de manganèse augmente dans celui-ci. Le manganèse fait apparaître la couleur verte du diopside plus belle.

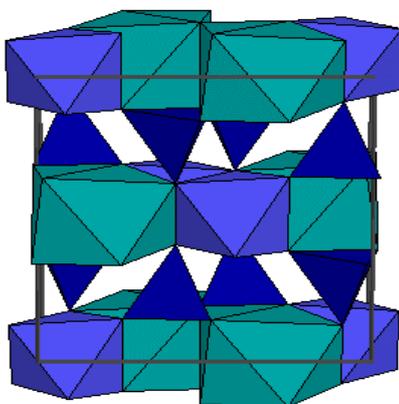
L'ion zinc peut aussi être détecté en très faible quantité (0.3 pfu), (analyse faite à Franklin au New Jersey).

Le titane est détecté aussi en quantité non négligeable, jusqu'à 0.65%.

Enfin l'ion aluminium qui est présent dans la plus part des diopsides avec Al se substituant à Si mais dans tous les cas Al est toujours inférieure à 10%.

L'aluminium entre dans la structure du diopside d'autant plus facilement que la pression de formation est forte. (Deer et al., 1992)

Figure N°2 : Structure du diopside



I.6 Propriétés physiques et optiques du diopside

Le diopside a une « dureté de Mohs » assez faible, variant de 5.5 à 6.5 ce qui explique la difficulté à tailler cette gemme qui de plus possède un clivage très facile. Ainsi de nombreux diopsides sont taillés en cabochon. (Schumann, 2000).

Le diopside a un éclat vitreux et une dispersion très faible variant de 0.017 à 0.020. Sa biréfringence varie de +0.024 à +0.031.

Sa densité est assez variable de 3.22 à 3.38. (Schumann, 2000).

En ce qui concerne la luminescence, pour les ondes longues (ultra violet), on peut avoir du vert, du jaune moutarde ainsi que de l'orange, (Schumann, 2000).

Pour les ondes courtes la luminescence peut paraître mauve, orange et jaune, (Schumann, 2000). ; mais la plus part des gemmes sont inertes.

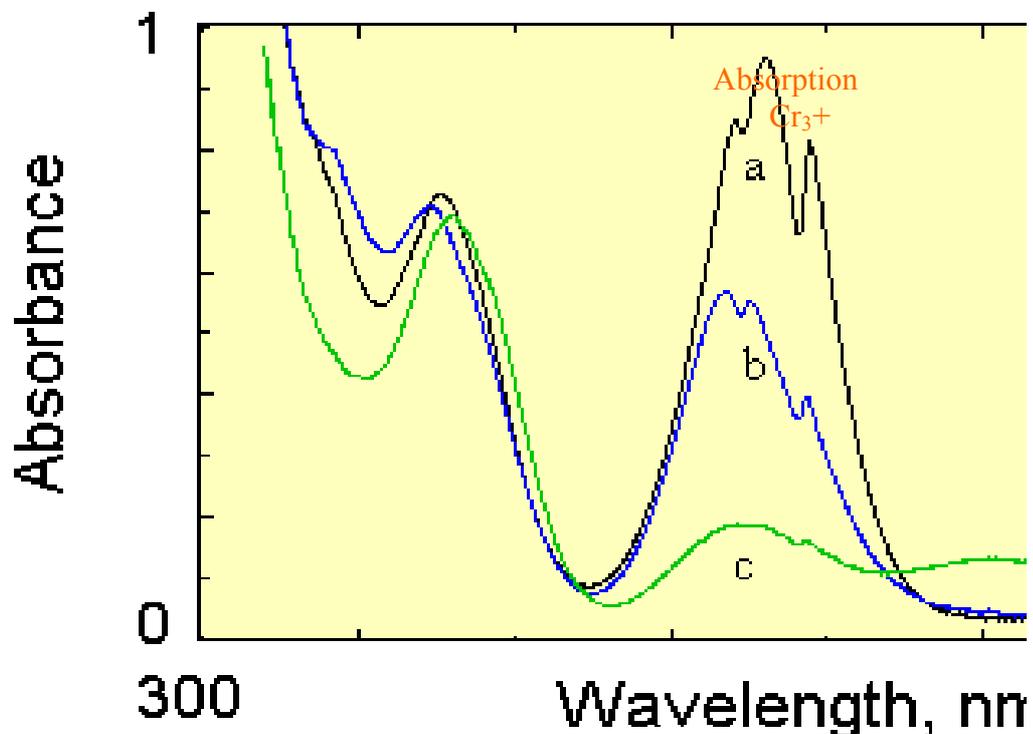
Les indices de réfraction dans un diopside sont : Alpha =1.664-1.695 et B[']ref=0.031 ; Bêta = 1.6715-1.701 et B[']ref = 0.0295 et Gamma = 1.694-1.721 avec B[']ref = 0.027 (Arem, 1987).

Lorsque Mg²⁺ est remplacé par Fe²⁺ les indices de réfractons augmentent, par exemple l'hedenbergite qui fait partie de la famille des clinopyroxènes et qui a pour formule chimique CaFeSi2O6 a des indices de réfraction compris entre 1.72 et 1.75. Les effets de l'ion fer sur les indices de réfraction ont été étudiés par Seguit en 1953, qui a démontré que les indices augmentaient de 0.03 pour chaque pour cent de plus de Fe2O3. (Deer et Al., 1992).

Le 2V du diopside varie de 56° à 60° ; l'ion Fe n'a pratiquement aucune incidence sur la variation de cet angle ; par contre lorsque le diopside possède jusqu'à 0.1% de Na l'angle 2V va varier de 70 à 75°. L'angle d'extinction est lui de 38°. (Deer et Al., 1992).

En ce qui concerne les spectres d'absorption : dans le diopside chromifère, on remarque deux raies fines l'une à 508 nm et l'autre à 505 nm dans le vert et une à 490 nm dans le bleu. (Webster, 1970). On a aussi des bandes à 635 nm, 655 nm et 670 nm. (Webster, 1970). Dans les autres diopsides d'un vert plus mat, on ne voit pas de beau spectre mais on peut voir les bandes à 505 nm, 493 nm, 446 nm. (Webster, 1970).

Figure N°3 : Spectre uv-visible-PIR d'un diopside russe. Image tirée Du site internet George Rossman



Voici (Fig.3) ce que l'on devrait obtenir selon le site de Rossman pour un diopside chromifère. (Rossman, 2003).

(http://minerals.gps.caltech.edu/FILES/Visible/pyroxene/Diopside_Cr3_2.gif).

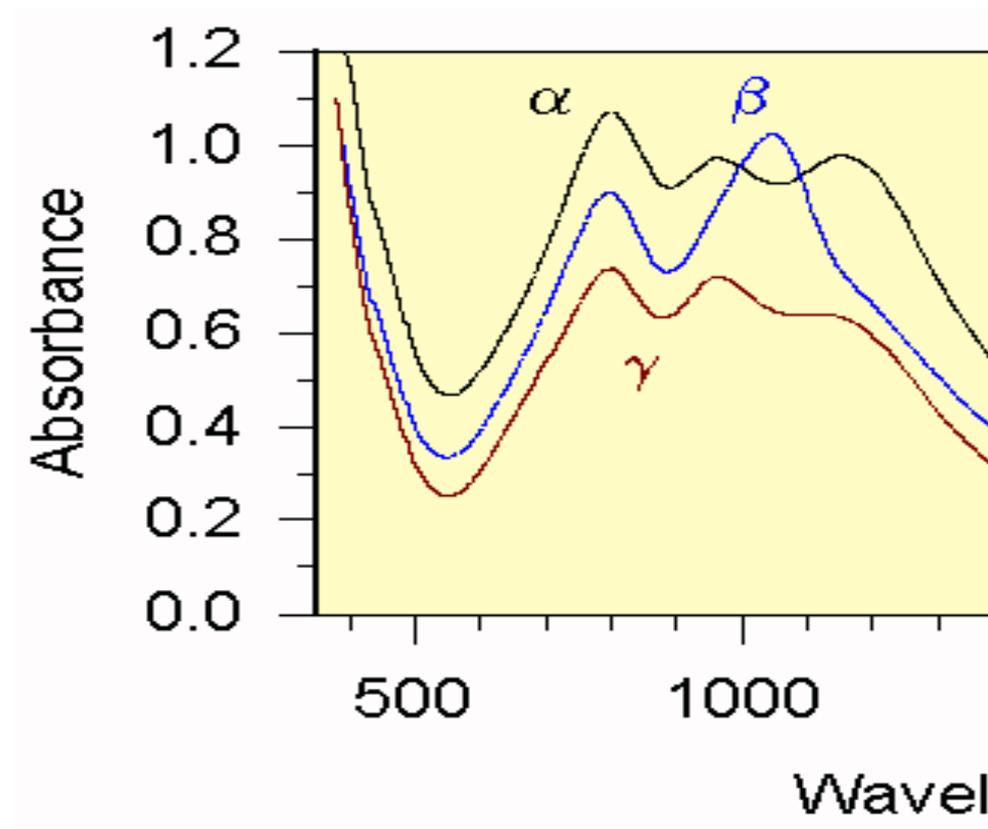
Le diopside a un système cristallin monoclinique, et doit donc être observé selon trois axes a,b,c définis par les angles Alpha, Bêta et gamma.

On voit très nettement sur la position selon l'axe a et b, la marque de l'ion Cr_3^+ qui se caractérise par les trois bandes entre 630nm et 700nm, (fig.n°3).

Les diopsides du Pakistan et de Madagascar sont des diopsides connus pour leur forte teneur en fer (pour ces deux diopsides plus de 2% d'atomes de fer), ainsi voici ce qu'on aurait pu voir avec un spectromètre uv-visible-infrarouge allant de 200nm à 2500 nm (Fig. N°4).

Voir image ci-dessous:

Figure N°4 Spectre uv-visible d'un diopside Binntal Wallis (Ferrifère)



http://minerals.gps.caltech.edu/FILES/Visible/pyroxene/diop_bw.gif

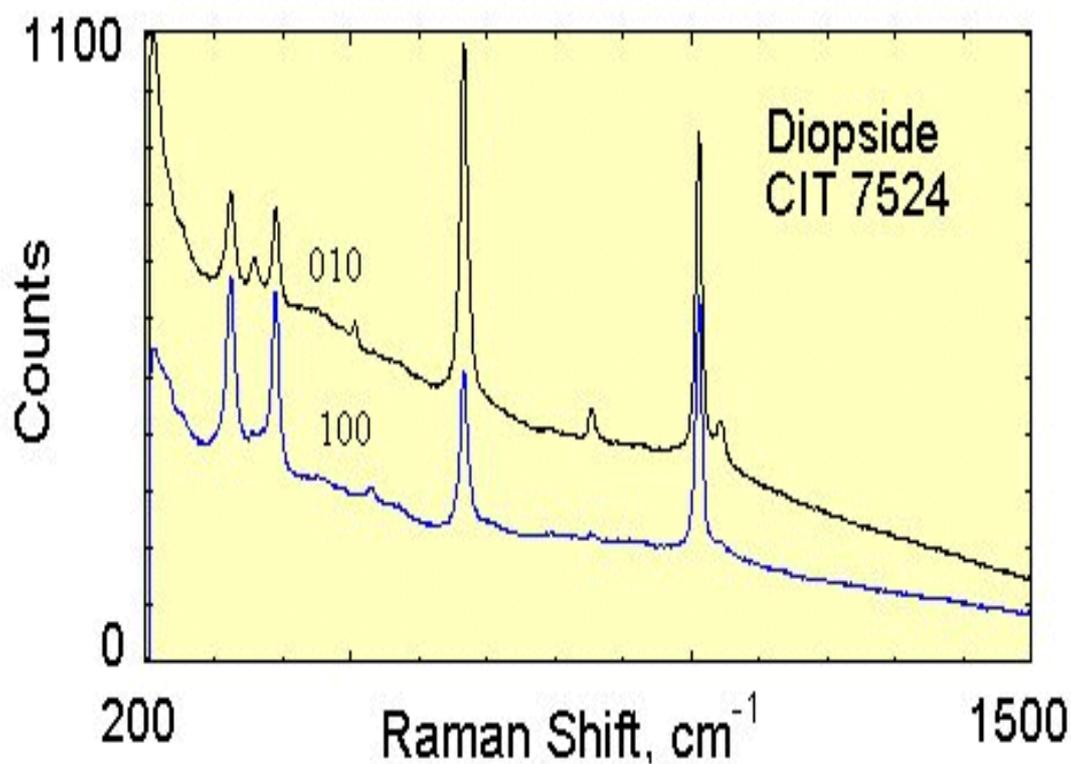
D'après mes références, (Internet, Raman14_5[1].pdf(protege)), le diopside qui a pour formule chimique $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ a pour principaux pics de diffusion Raman la raie à 1007 cm^{-1} et la raie 667 cm^{-1} qui sont dues aux vibrations entre le silicium et l'oxygène, (Si-O).

Deux autres pics sont caractéristiques du diopside mais pour un signal un peu plus bas en intensité, ce sont les pics à 330 cm^{-1} et à 390 cm^{-1} , le premier étant du aux vibrations de la liaison calcium-oxygène (Ca-O) et le second à la liaison magnésium-oxygène (Mg-O).

Voici un échantillon de référence d'un diopside suisse :

http://minerals.gps.caltech.edu/FILES/raman/Caltech_data/dlist/diop7524.gif

Figure N°5 : Spectre Raman du diopside



I.7 Tableau récapitulatif des caractéristiques du diopside

Le tableau n°1 regroupe l'ensemble des caractéristiques du diopside.

Tableau N°1

Propriété	Caractéristiques du diopside
Couleur	Vert (sombre, clair, vert olive, vert émeraude...), jaune, incolore, noir, violet
Dureté	5.5 à 6.5 (sur l'échelle de Mohs)
Densité	3.22 à 3.38
Clivage	Facile, {110} bon, et {100}, {010}.
Indices des réfractions	a=1.664-1.695 b=1,672-1.701 c=1.695-1.721
Biréfringence	+0.024 à +0.031
Luminescence	2/3 des gemmes inertes + Violet, orange, jaune et vert.
Chimie	CaMgSi₂O₆ Substitutions possibles : Fe, Al, Na, Cr,Mn,V...
Transparence	Transparent à opaque
Cassure	Simple et multiple {100} et {001}
Dispersion	r > v, faible à modéré (0.017-0.020)

I.8 Variétés et gisements

Il existe plusieurs variétés de diopside, qui proviennent de plusieurs origines géographiques :

- **Diopside ferrifère** : diopside possédant du fer en quantité non négligeable. Plus l'ion fer est présent plus le vert paraît sombre. Ce diopside se trouve au Brésil (Etat de Mines Gerais), à Madagascar, au Myanmar (un peu moins sombre). (Webster, 1970 ; Bariand & Poirot, 1998).

- **Black star** : c'est un diopside étoilé d'un vert très sombre allant même jusqu'au noir, il est légèrement magnétique. L'astérisme révélé par la taille cabochon est dû à la présence de fines lamelles allongées de magnéto-ilménite en texture d'exosolution selon deux directions se croisant à 73°. L'étoile obtenue est une étoile à 4 branches constituée d'une raie fine coupée obliquement par une bande plus diffuse. Il existe aussi en 6 branches. Ce diopside, selon mes sources se trouve uniquement en Inde (au Nammakal) où on lui prêtait le nom de « saphir noir étoilé des Indes » pour le vendre aux touristes. (Arem, 1987 ; Bariand & Poirot, 1998).

- **Diopside chromifère** : diopside contenant une quantité de chrome assez importante (jusqu'à 2% de Cr₂O₃), sa couleur est très prisée, la même que celle de l'émeraude « vert émeraude ». C'est le plus cher des diopsides. Ce diopside se trouve dans les kimberlites (comme le diamant) en Afrique du sud, au Kenya, au Sri Lanka, en Finlande, mais surtout en Russie (slyudyanka). (Bariand & Poirot, 1998), (Arem, 1987).

- **Diopside vanadifère** : diopside comme son nom l'indique possédant du vanadium donnant au diopside une couleur vert prairie. Celui-ci provient de Tanzanie du gisement de Melerani. (Koivula et al., 1992).

- **Violane** : diopside de couleur violacé, le plus souvent opaque il est donc taillé sous forme de cabochon et est assez rare. Il se trouve en Italie (Piémont à saint Marcel), Burma. (Poirot & Bariaud, 1998 ; Arem, 1987 ; Webster, 1970).

- **Tashmarine** : c'est une variété de diopside récemment découverte en 2002 (Shor et al., 2002), Elle a une couleur d'un vert unique en ce qui concerne la famille du diopside. Elle se trouve dans les hautes montagnes au centre de l'Asie. (Gemstones, 2002).

- **Schefferite** : variété de diopside riche en manganèse, sa couleur varie du marron clair au marron foncé. Elle se trouve en Suède (langban, Filipstad). (Schumann, 1998 ; Arem, 1987).

- **Zn-Schefferite** : la même variété mais riche en zinc aussi. Elle se trouve en Suède (langban, Filipstad), au New Jersey au Etats-Unis. (Arem, 1987).

- **Alalite** : diopside d'un très beau vert provenant d'Italie à Ala au Piémont. (Bariand, Poirot, 1998 ; Arem, 1987).

- **Baïkalite et malacolite** : diopside vert appelé d'après la région où il a été trouvé au Baïkal en Russie.

Il existe d'autres gisements de diopside en Autriche (Zillertal) d'un beau vert et quelques fois transparent, en Birmanie, dans différents états des Etats-Unis (Californie, New York, New Jersey), au Zaïre, au Canada (Ontario et Québec) diopside d'une couleur allant du jaune au vert, du Pakistan, et tout récemment en Chine à Xinjiang. (Arem, 1987).

Figure N°6 : divers diopsides (Duda et al.,1986)

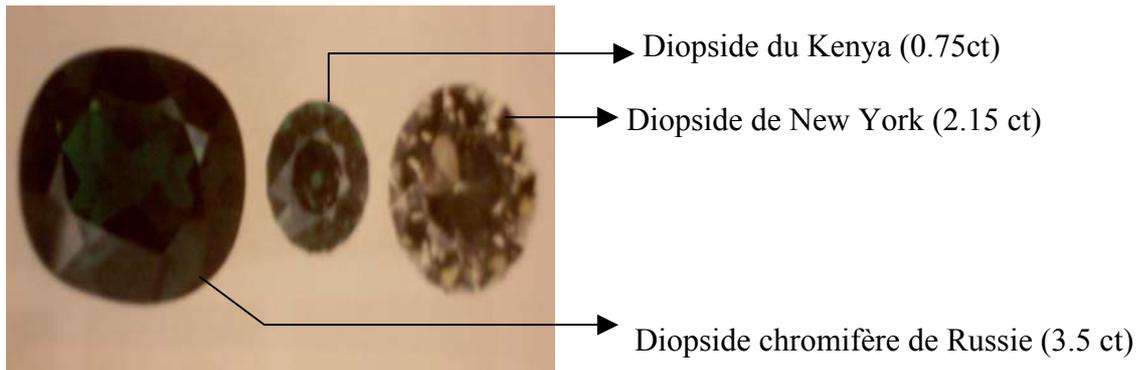


Figure N°7 : Diopside chromifère

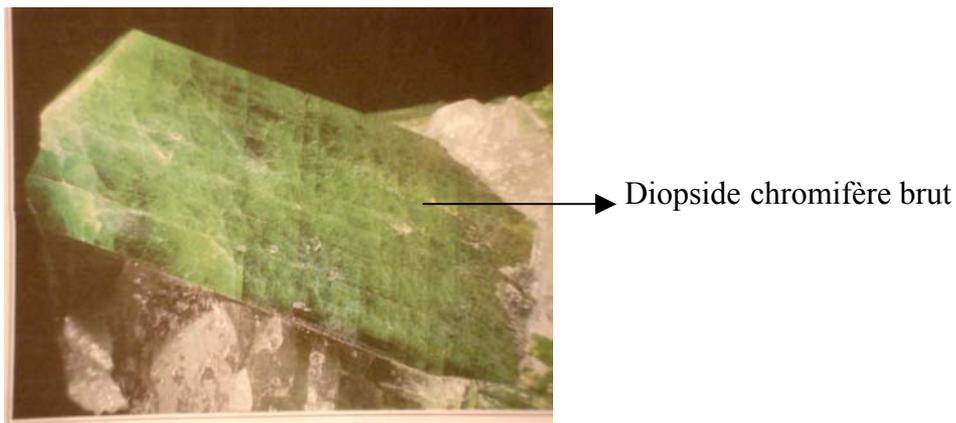
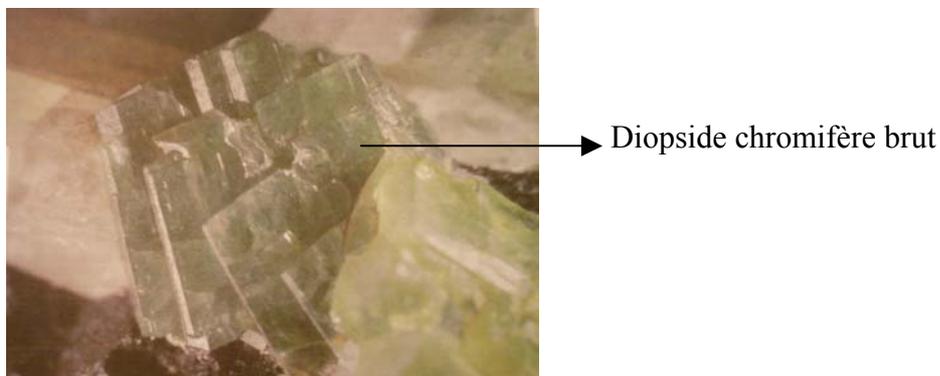


Figure N°8 : diopside chromifère



La figure N°6 nous montre trois diopsides taillés originaire des « 3 coins du globe » !

II. Méthodes.

II.1 Méthodes de gemmologie classique

II.1.1 la balance hydrostatique

Pour calculer la densité des différents échantillons, on utilise une balance hydrostatique, (voir Fig.n°9).

La densité relative ou masse spécifique d'une matière est définie comme le rapport entre la masse d'un volume donné de cette matière et la différence de masse avec un volume identique d'eau. (Schumann, 1998). Ainsi on détermine le poids P_a de la pierre précieuse dans l'air et son poids P_e après immersion dans l'eau. Ensuite grâce au principe d'Archimède, cette différence de poids est égale au poids de l'eau déplacé du fait de l'immersion, il s'ensuit la formule suivante : $d = P_a/(P_a - P_e)$.

Figure N°9 : Balance hydrostatique



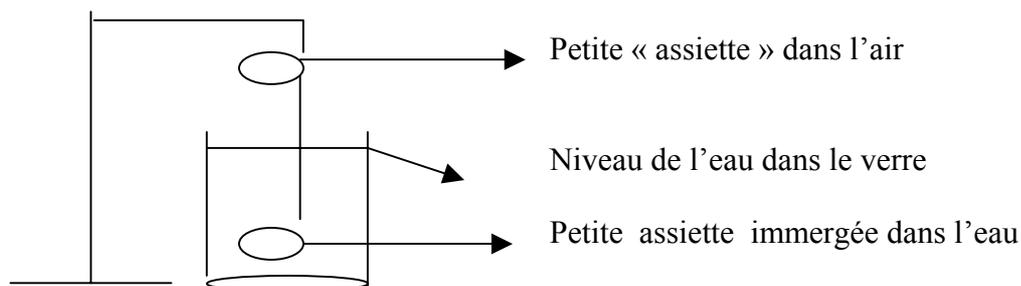
-On remarque que le verre est au dessus de la balance et ne fait donc pas partie du poids calculé.

-Le petit filament qu'on distingue, qui est souvent composé de cuivre, est lui bien relié à la balance hydrostatique. On devra donc remettre la balance à zéro pour que son poids ne soit pas pris en compte.

-Le filament est constitué de 2 petites « assiettes », l'une pour calculer le poids de la gemme dans l'air et l'autre pour calculer le poids de la gemme dans l'eau.

Pour cela nous avons procédé comme l'indique le schéma suivant (fig.10) :

Figure N°10



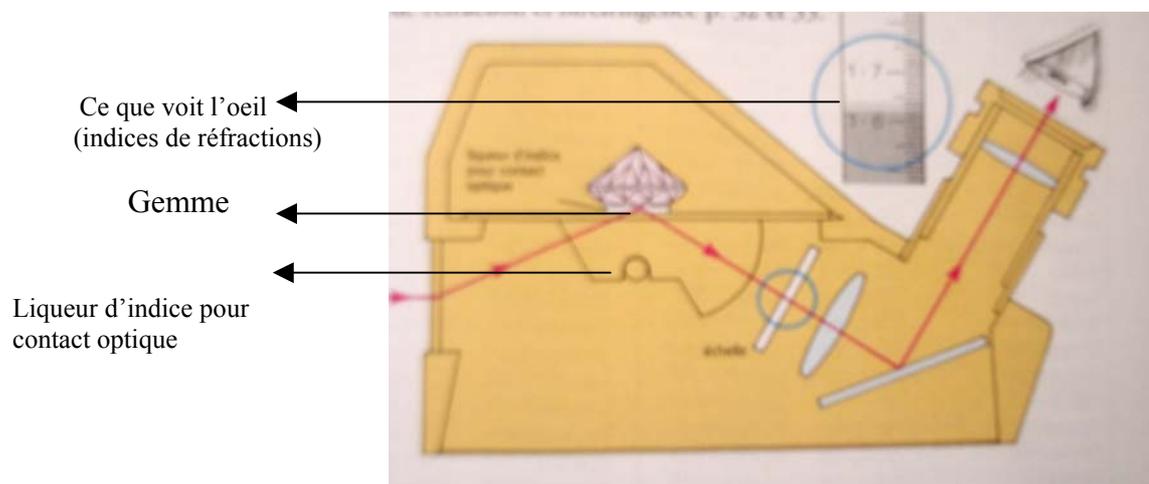
II.1.2 Le réfractomètre.

Pour la mesure des indices de réfraction, les gemmes utilisées doivent être facettées ou pour le moins avoir une surface plane, c'est pour cela qu'on a pu déterminer ces indices que pour certains échantillons.(voir chapitre résultat).

Voici la description d'un réfractomètre (figure n°11) et comment et mesurer l'indice de réfraction de la gemme, illustré dans le schéma ci-dessous :

Schéma d'un réfractomètre à lecture
Directe, avec échelle de lecture explicitée

(Schumann, 2000), Figure N°11



L'appareil que j'ai utilisé, est un réfractomètre GIA Gem instruments modèle Topcon appartenant à l'université de Nantes.

II.1.3 Microscopie optique

Nous avons observé les inclusions, le pleochroïsme et le doublage de nos échantillons grâce à un microscope optique permettant un grossissement jusqu'à 40 fois, et permettant l'observation entre polariseur croisés.

L'appareil utilisé est un microscope Leica MZ6 avec des accessoires de gemmologie Nossigem et appartenant à l'université de Nantes.

II.1.4 Luminescence et phosphorescence.

Nous avons observé la luminescence et la phosphorescence de nos échantillons sous les rayons ultraviolets courts (254 nm) et sous les rayons ultraviolets long (366 nm) d'une lampe

II.2 : Méthodes de laboratoire.

II.2.1 Microscope électronique à balayage.

Principe de fonctionnement:

Le microscope électronique à balayage est un appareil utile en gemmologie, car celui-ci est non destructif, et permet de faire des analyses chimiques de surface tant au niveau qualitatif et que quantitatif. On peut aussi l'utiliser pour l'obtention d'images.

Préparation de l'échantillon :

Le but de cet ensemble de manipulations est de rendre notre échantillon conducteur afin que les électrons puissent être évacués.

Tout d'abord on devra préparer l'échantillon si c'est possible de façon à ce qu'il ait deux faces parallèles, ou tout du moins une face plane.

Ensuite, on doit nettoyer l'échantillon avec de l'alcool afin de ne pas laisser de trace de doigts car celles-ci pourraient être analysées par le microscope électronique. Puis à l'aide d'une brucelle, on monte l'échantillon sur un support métallique de telle manière que le faisceau frappe perpendiculairement à une face plane. Enfin, on met « en contact » la gemme avec le support métallique grâce à de la laque d'argent.

Après cela, dans une chambre à vide on métallise chacune des gemmes avec de la poudre de carbone ou un alliage or-palladium, ainsi les gemmes sont rendues conductrices.

Conditions expérimentales : Nous avons utilisé un Meb Jeol 5800 au centre de microcaractérisation de l'IMN, et le courant utilisé était de 1200 V pour 5 mA.

II.2.2 La spectrométrie uv-visible-proche infrarouge

Principe de fonctionnement

On utilise le spectromètre uv-visible-proche infrarouge, pour séparer certaines gemmes naturelles des synthétiques, pour la distinction de certains traitements dans les gemmes mais surtout pour connaître l'origine de la couleur dans la gemme.

Le principe est assez simple: on passe un faisceau lumineux avec une intensité I , celle ci ressort avec une intensité I_0 , et grâce à une formule mathématique ($A = \log_{10} I_0/I$) on a l'absorbance de la gemme pour chaque longueur d'onde.

Préparation de l'échantillon:

On doit polir si possible la gemme si celle ci ne possède deux faces parallèles.

Ensuite, On doit choisir une 'bonne position' pour la gemme, c'est à dire la positionner de telle manière à ce que le faisceau lumineux passe entre deux faces à lames parallèles.

Enfin, on doit couvrir les bords de la gemme de scotch noir ou de pâte à modeler ou autre afin qu'on soit sûr que le faisceau est passé au travers de celle-ci uniquement.

Conditions expérimentales : nous avons utilisé un spectrophotomètre UV-Vis-PIR Unicam UV4, il a un domaine spectral allant de 200 nm à 900 nm, une bande passante spectrale de 1 à 0,1 nm échantillonnage tous les 2 à 0,2 nm maximum.

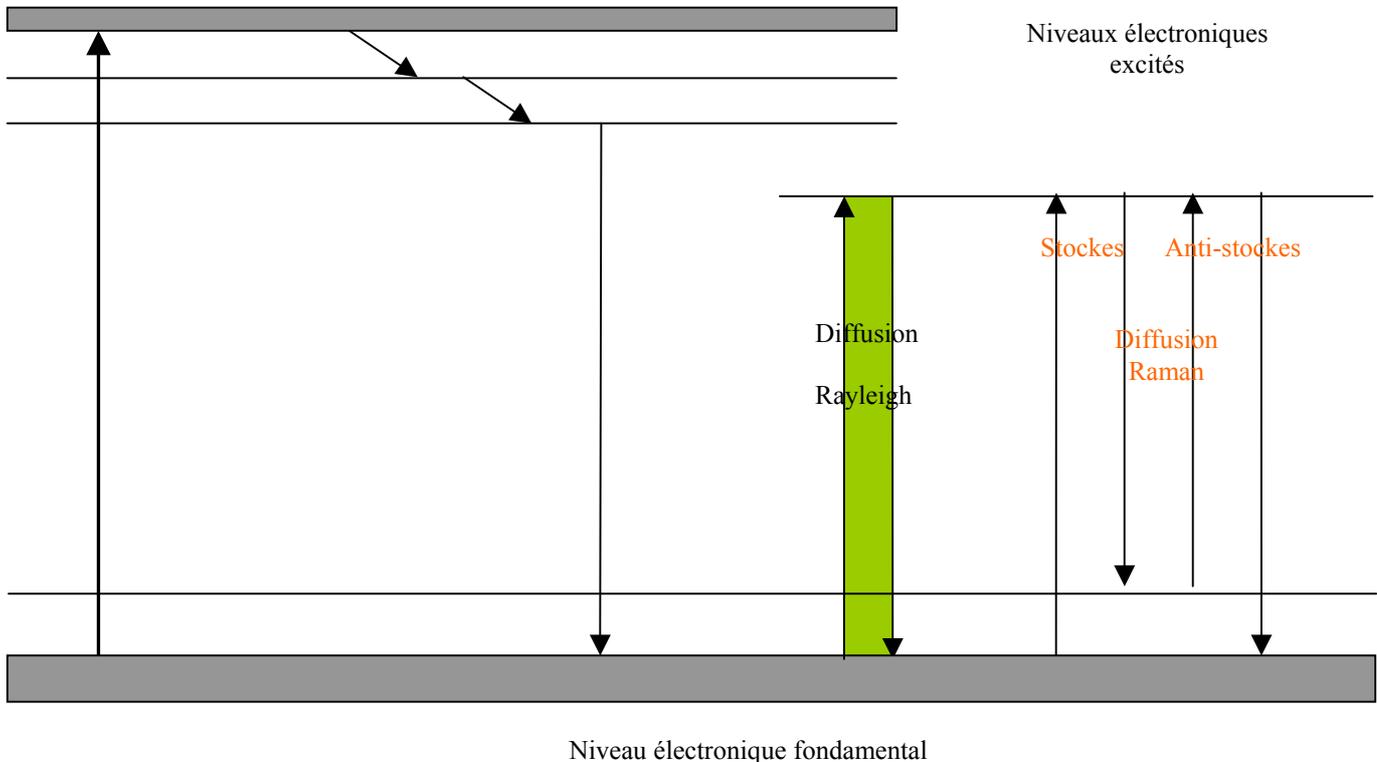
II.2.3 Spectrométrie Raman

Principe de fonctionnement:

La diffusion de la lumière se compose en deux diffusions principales, la diffusion Rayleigh qui représente 99.999999 de la diffusion et la diffusion Raman, qui représente 0.0000001% de la diffusion.

Voir schémas ci-dessous : (Figure N°12)

Relaxation de l'énergie par conversion interne



Donc d'après le schéma, c'est le passage de l'énergie du niveau fondamental au niveau excité puis du niveau excité au niveau fondamental qui est responsable de la diffusion.

Les deux premières raies de la diffusion Raman sont les raies Stokes et les deux suivantes les raies antistokes. On remarque que les raies Stokes et antistokes sont parfaitement symétriques.

On obtient un signal qui est dû aux vibrations entre des atomes les uns avec les autres. En fait chaque vibration entre deux atomes ou plus va se manifester par un pic à un nombre d'ondes donné, cela est donc un code barre de l'édifice cristallin spécifique à chaque minéral.

Les courbes obtenues par le Raman ont pour unités :

En abscisse : le nombre d'ondes = $1/\text{longueur d'onde}$ (cm-1).

En ordonnée : l'intensité du signal.

Préparation de l'échantillon :

Aucune préparation de l'échantillon n'est nécessaire cependant il est important de noter la position de l'échantillon lors de l'analyse de la gemme. (Orientation du faisceau par rapport aux axes cristallographiques).

Conditions expérimentales :

Nous avons utilisé un spectromètre Raman à transformée de Fourier RFSi100 de chez Bruker à une résolution de 4 cm⁻¹.

III ° Partie: Les échantillons.

III.1 Présentation des différents échantillons.

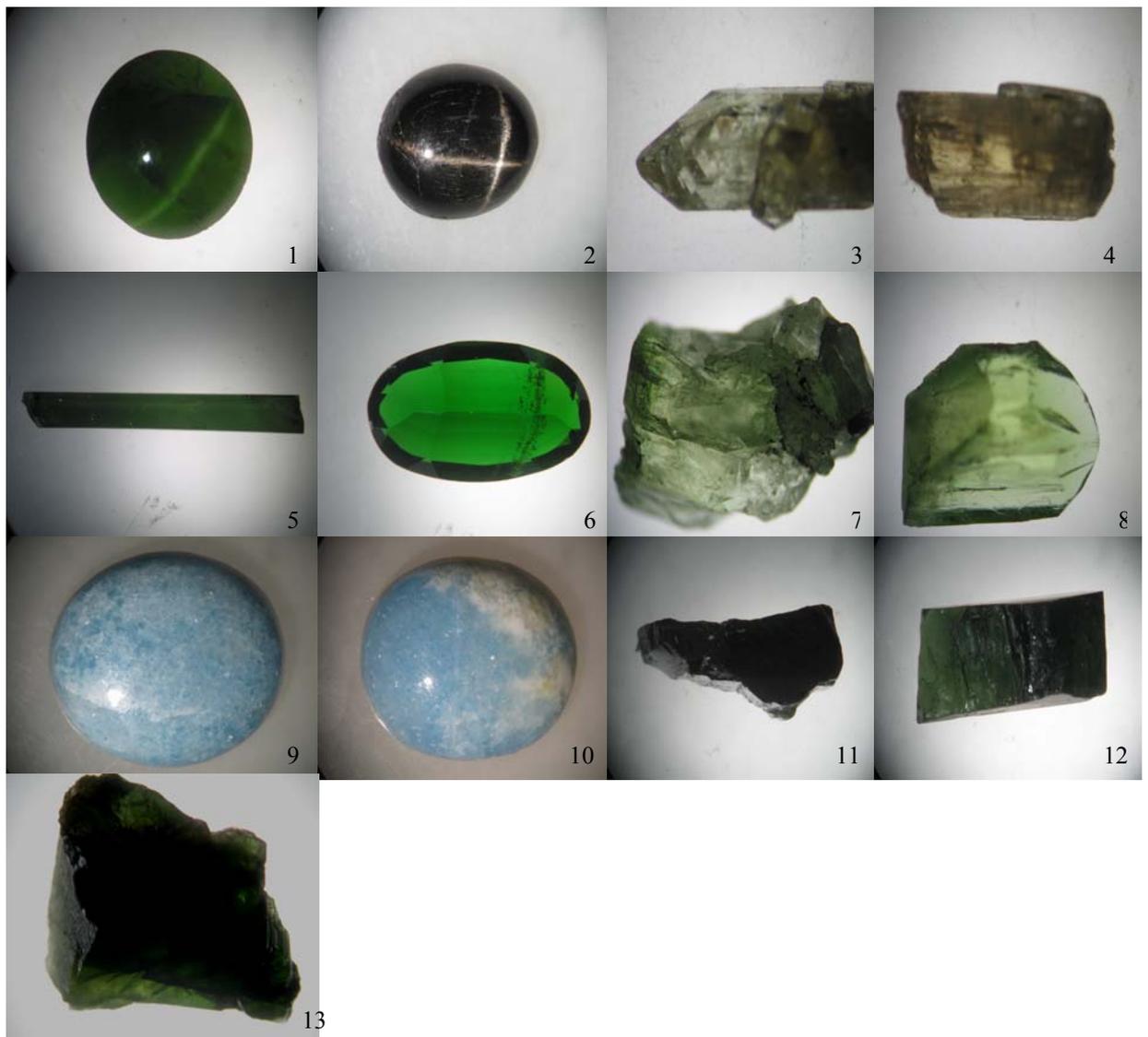
Le tableau N°2 présente les échantillons en leur attribuant des numéros, donne le poids, l'origine de chacun des échantillons, ainsi qu'une description physique.

Tableau n°2

N°	Nature	Provenance	Description	Poids (Ct)
1	Diopside chromifère	Inconnue	Taillé en cabochon, vert foncé étoilé, transparent. On a un effet oeil de chat.	1.66
2	Diopside black star	Inde	Taillé en cabochon, vert noirâtre. Apparition de l'étoile à 4 branches. Opaque	1.12
3	Diopside	Asbestos (Québec)	Brut, vert à vert pâle. Le haut du diopside et sa pointe ont une couleur blanche. Translucide	0.93
4	Diopside	Asbestos (Québec)	Brut verdâtre. Translucide	PAS FAIT
5	Diopside	Pakistan	Taille prismatique, couleur vert sombre. Transparent	1.96
6	Diopside chromifère	Russie	Taille navette. Diopside vert à vert sombre, transparent	3.05
7	Diopside vanadifère	Tanzanie	Brut, de couleur verte, opaque	3.44
8	Diopside vanadifère	Tanzanie	Brut de couleur vert clair, translucide	1.62
9	Violane	Nord Baïkal Russie	Taillé en cabochon, couleur allant du bleu clair au violet. Apparition d'un autre minéral de couleur blanche. Opaque	15.55
10	Violane	Nord Baïkal Russie	Taille cabochon, couleur bleu violacé, apparition d'un autre minéral de couleur blanche. Opaque	15.2
11	Diopside ferrifère	Madagascar	Brut, couleur vert sombre. Opaque.	1.94
12	Diopside ferrifère	Madagascar	Brut, couleur vert sombre, opaque.	11.05
13	Diopside ferrifère	Brésil	Brut, couleur vert sombre, translucide.	5.08

Les photos des échantillons sont présentées figure N°13, les numéros renvoient au tableau N°2.

Figure N°13



IV. Résultats

IV.1 Résultats des méthodes de gemmologie classique.

IV.1.1 Densité, indices de réfraction et résultat de la luminescence.

Le tableau N°3 rassemble l'ensemble des résultats de densité, d'indices de réfraction ainsi que la luminescence.

Remarque: pour distinguer le côté droit du coté gauche pour l'échantillon (5) on a, sur cette gemme, un ensemble d'inclusions fluides en haut de la gemme.

Pour l'échantillon (5) angle de 90° formé sur l'une des pointes puis on tourne l'échantillon de 90° suivant les aiguilles d'une montre.

Pour l'échantillon (7) on prend la plus grande base de la gemme puis on fait tourner selon trois directions dans le sens des aiguilles d'une montre.

Tableau N°3

N°	Densité	Indices de réfraction	Biréfringence	Pléochroïsme	UVL	UVC
1	3.20	Non mesuré	Non mesurée	Non	inerte	inerte
2	3.33	Non mesuré	Non mesurée	Non	inerte	inerte
3	3.35	1.710-1.718	0.008	Jaune au vert	Orange (Mn ²⁺)	Orange moyen Mn ²⁺
4		1.71-1.72	0.010	Jaune au vert	inerte	inerte
5	3.29	Direct°1:1.680-1.690 Direct°2:1.680-1.691 Direct°3:1.684-1.691 Direct°4:1.690-1.692	0.012	Jaune sombre à vert plus clair	inerte	inerte
6	3.27	Non mesurée	0.031	Jaune à vert	inerte	inerte
7	3.22	Direct°1:1.668-1.690 Direct°2:1.668-1.698 Direct°3:1.672-1.680	0.030	Non	Orange	Jaune intense
8	3.23	Direct°1:1.666-1.672 Direct°2:1.673-1.700 Direct°3:1.695-1.700	0.034	Non	Orange	Jaune intense
9	3.08	Non mesuré	Non mesurée	Non	Minéral blanc : Luminescence Jaune blanc	Blanc jaune Plus marqué
10	2.97	Non mesuré	Non mesurée	Non	Minéral blanc : Luminescence Jaune blanc	Blanc jaune Plus marqué
11	3.32	Non mesuré	Non mesurée	Vert à vert plus clair	inerte	inerte
12	3.35	Direct°1:1.697-1.702	0.05	Jaune à noir	inerte	inerte
13	3.30	Non mesuré	Non mesurée	Non	inerte	inerte

IV.1.2 Le Microscope Optique.

La microscopie optique nous a permis d'observer des inclusions fluides, le doublage dû à la biréfringence et le pléochroïsme.

Figure N°14 : inclusions fluides dans l'échantillons N°6

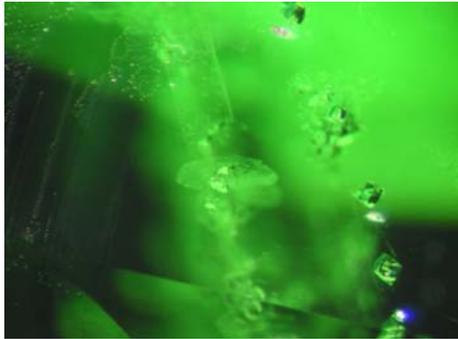


Figure N°15 : doublage des arêtes dans l'échantillon N°6

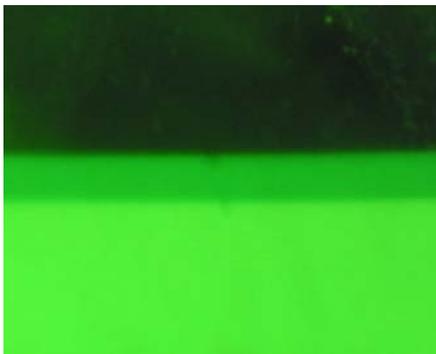


Figure N°16 : Inclusions fluides dans l'échantillon N°5

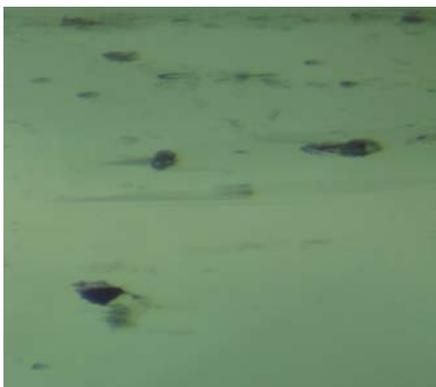
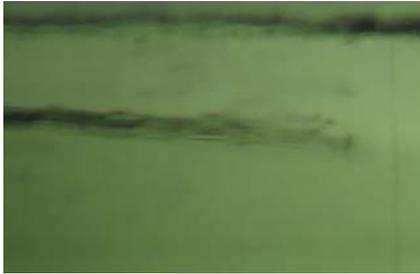


Figure N°17 : Inclusions linéaire allongée dans l'échantillon N°5



- Le pléochroïsme de l'échantillon N°6 (fig.13) va du vert clair au jaune pâle.
- L'échantillon N°11 (fig.13) a un pléochroïsme jaune.

L'échantillon N°6 présente des inclusions fluides linéaires (fig.14), et on remarque aussi le doublage de certaines de ces arêtes (fig.15).

L'échantillon N°5 présente des inclusions fluides éparpillées sur la surface photographiée (fig.16), et aussi une inclusion linéaire allongée (fig.17).

IV.1.4 Luminescence et phosphorescence.

La luminescence des échantillons est résumée tableau N°3.

Plus des 2/3 des échantillons sont inertes, on observe cependant de la luminescence sur trois échantillons la violane, le diopside vanadifère et le diopside asbestos.

La lampe utilisée est une lampe ultraviolet A. Krüss optronic modèle UV 240 avec ultraviolets courts (254 nm) et longs (365 nm).

Pour des ondes longues:

- on observe une luminescence jaune blanc dans ce qui n'est pas diopside c'est-à-dire la partie blanche de la violane.

L'identification de celui-ci se fera lors des méthodes de laboratoire (microscope électronique).

- pour le diopside vanadifère apparition d'une luminescence orange sûrement due au manganèse (l'ion Mn^{2+}). (On essayera de confirmer cela lors des méthodes de laboratoire).

- la pointe du petit diopside asbestos fluoresce orange, l'origine étant sûrement du au manganèse.

Pour les ondes courtes:

- pour la violane, la luminescence blanc jaune est plus marquée dans les parties blanches du minéral.

- pour le diopside vanadifère, la luminescence est d'un jaune intense, on essayera de voir dans les méthodes de laboratoire d'où provient la couleur jaune intense.

- pour le diopside asbestos, on a une luminescence orange moyen. (Mn^{2+})

On ne voit aucune phosphorescence dans les gemmes étudiées.

IV.2 Résultats des méthodes de laboratoire.

IV.2.1 Microscope électronique à balayage

Analyse chimiques qualitatives:

Pour l'analyse qualitative de la composition chimique, on remarque que pour les différents échantillons les spectres sont composés des même raies principales (Ca, Si, Mg et O) et cela est logique car cela constitue la formule chimique du diopside. Par contre les éléments mineurs sont différents.

On détecte le fer dans tous les échantillons analysés, le chrome dans les échantillons 1, 6, 7, 8 ; le Na dans les échantillons 2 et 13, l'aluminium dans le 6 seulement et, Mn et V dans les échantillons 7 et 8.

La présence de ces éléments sera confirmée par l'analyse quantitative, présentées dans le chapitre suivant.

Voici l'image de certains de ces spectres les uns sous une forme habituelle, et d'autres sous la forme logarithmique afin de mieux distinguer les petits pics des éléments mineurs.

Figure N°18 : Spectre du diopside chromifère étoilé au MEB (échantillon N°1)

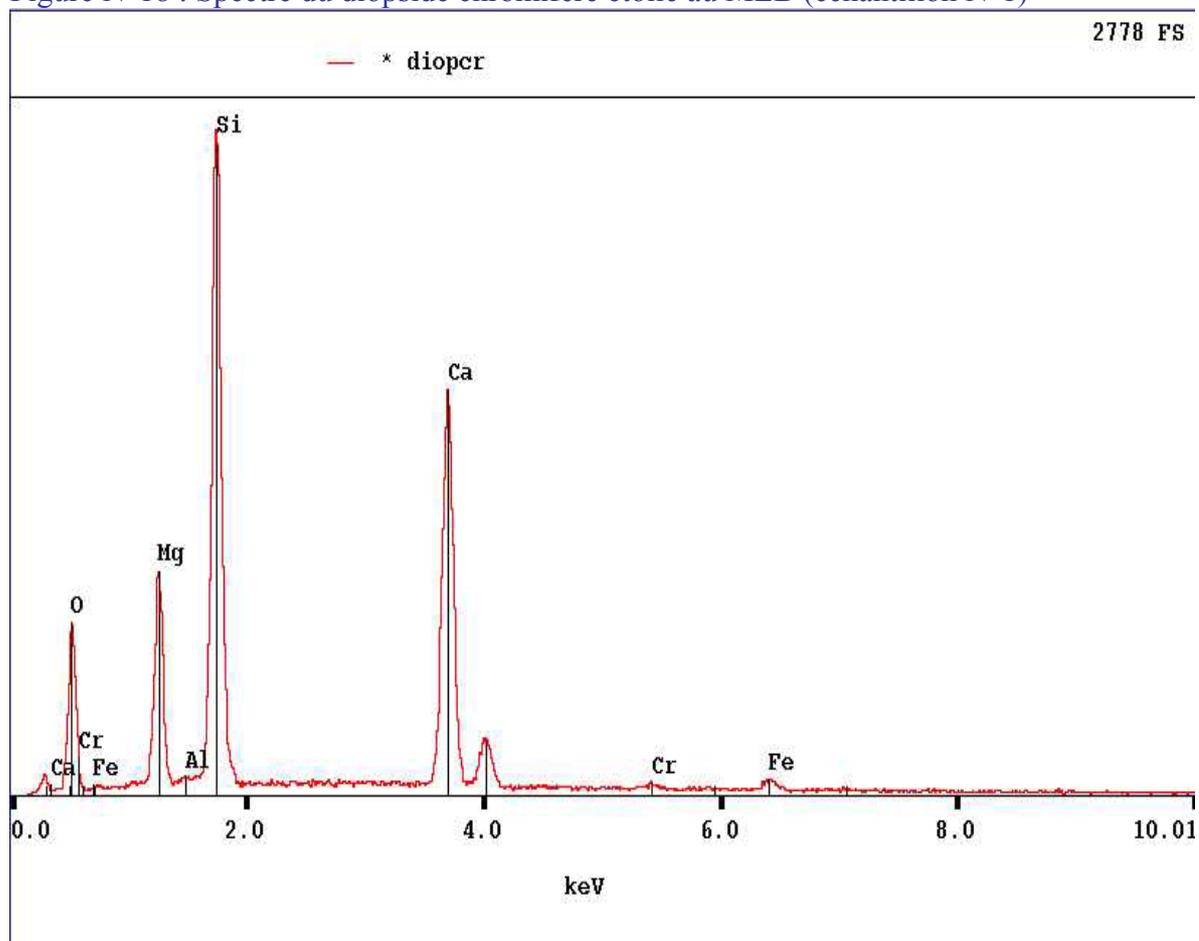


Figure N°19 : Spectre du diopside vanadifère au MEB (échantillon N°7)

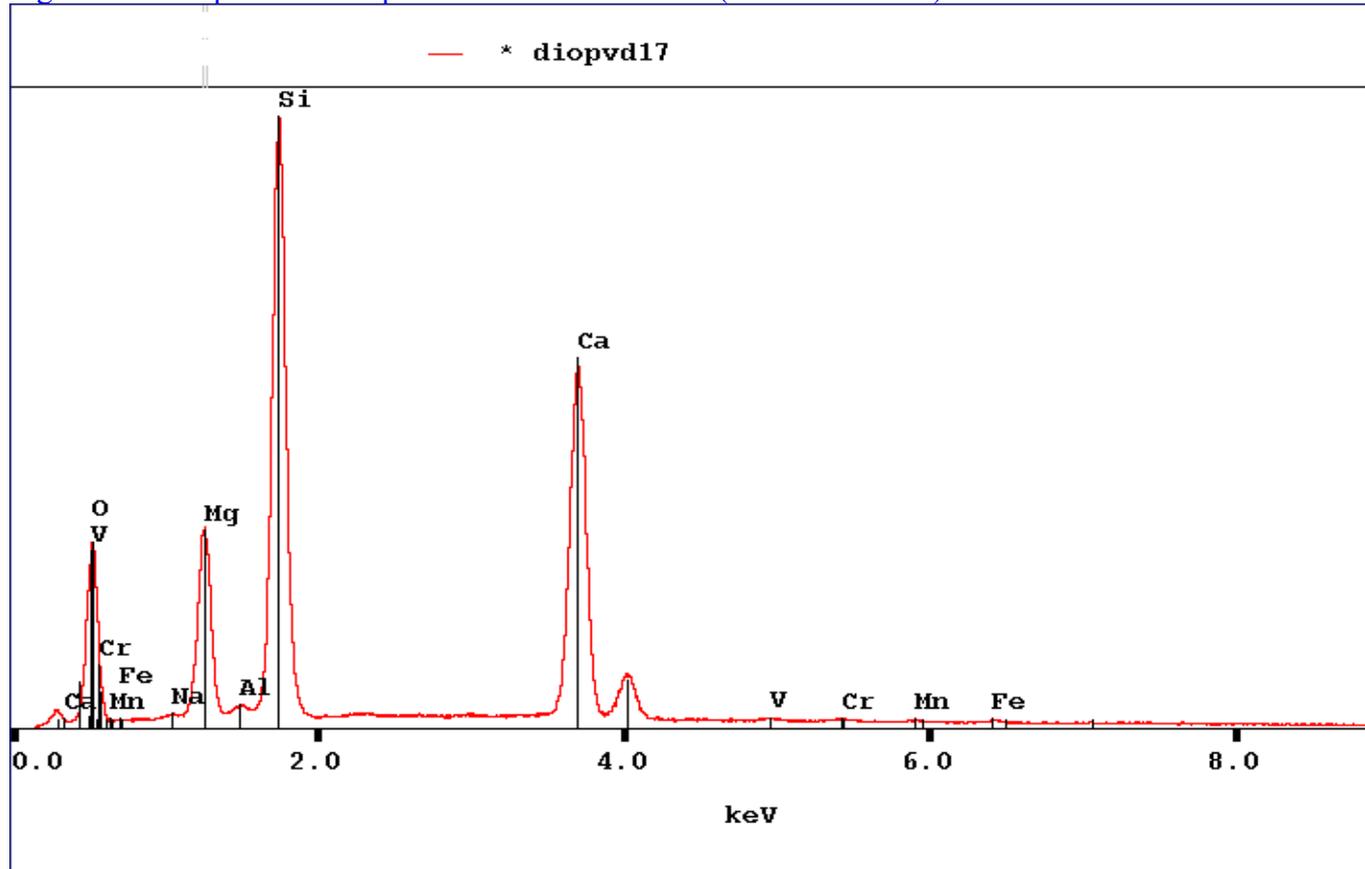
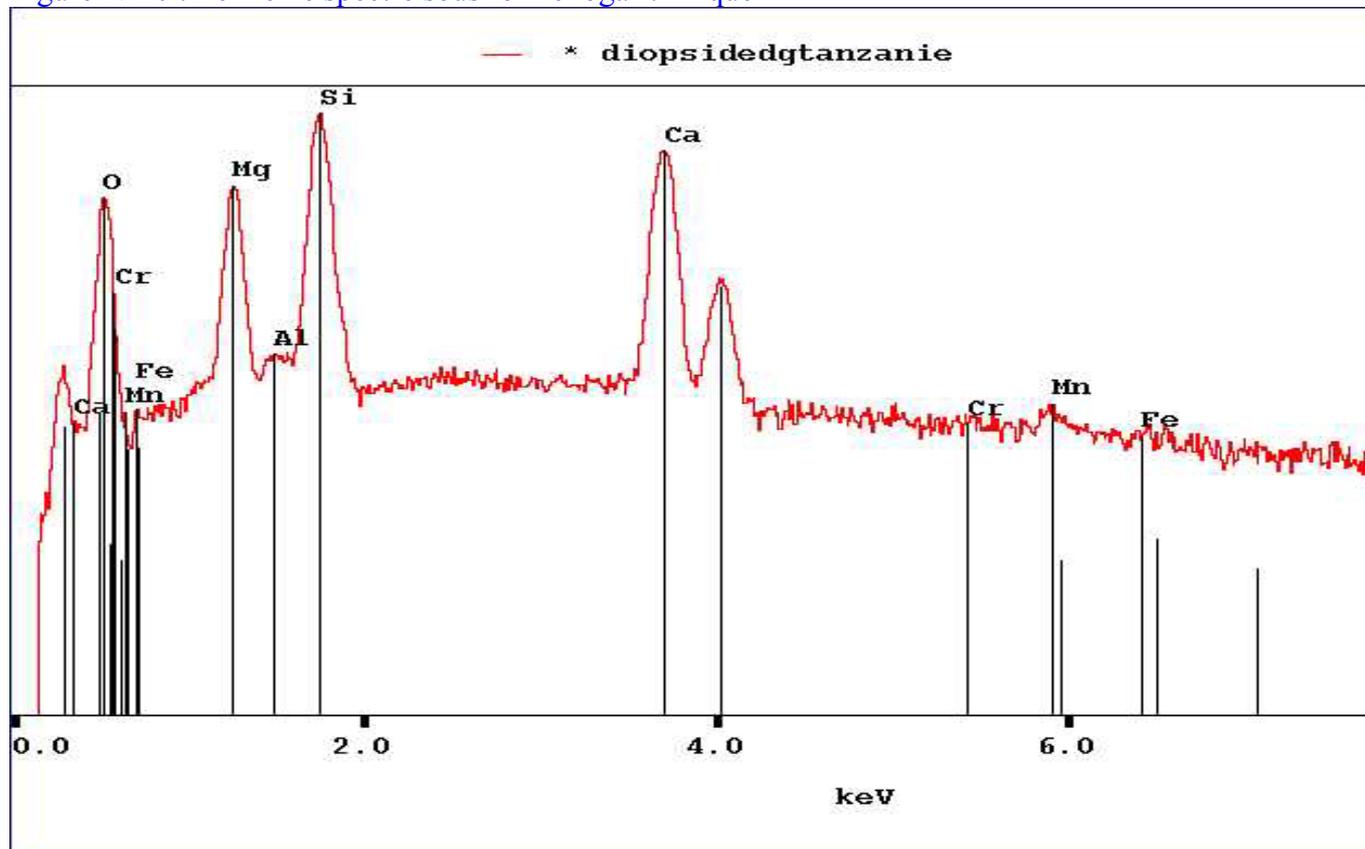


Figure N°20 : Le même spectre sous forme logarithmique



Analyse chimique quantitative:

La composition chimique des échantillons analysés est présentée dans le tableau N°4 qui représente le pourcentage atomique de chaque élément dans le diopside.

Pour les 4 éléments qui composent la formule chimique du diopside, on peut voir que leur valeur n'évolue que très peu. Le Ca varie entre 8.31 et 9.83%, le Mg varie entre 9.00 et 10.00%, le Si varie entre 19.42 et 20.45% et O varie entre 59.83 et 60.81%. On est bien en présence du diopside.

L'élément fer a un pourcentage atomique assez important alors que celui-ci n'apparaît pas dans la formule chimique. Son pourcentage varie entre 0.10 à 1.48%. On remarque aussi que plus la quantité de fer est grande plus la couleur verte s'assombrit. Les diopsides dénommés diopside chromifère ou vanadifère possèdent bien une quantité non négligeable des éléments en trace les qualifiant.

Tableau N°4 (les valeurs sont exprimées en % atomique)

N° des échantillons	Ca	Mg	Si	O	Fe	Mn	V	Cr	Al	Na
1	8.75	9.00	20.22	60.81	0.72	0	0	0.17	0.33	0
2	8.79	9.31	19.52	59.90	1.48	0	0	0	0.78	0.21
6	9.83	9.69	19.64	59.83	0.49	0	0	0.14	0.12	0.26
7	9.80	10.00	19.95	60.00	0.10	0.03	0.08	0.04	0	0
11	9.07	9.47	19.42	59.97	0.93	0.11	0	0.01	0	0
13	8.31	9.05	20.45	60.32	0.96	0	0	0	0.64	0.27

En théorie, on a pour le diopside

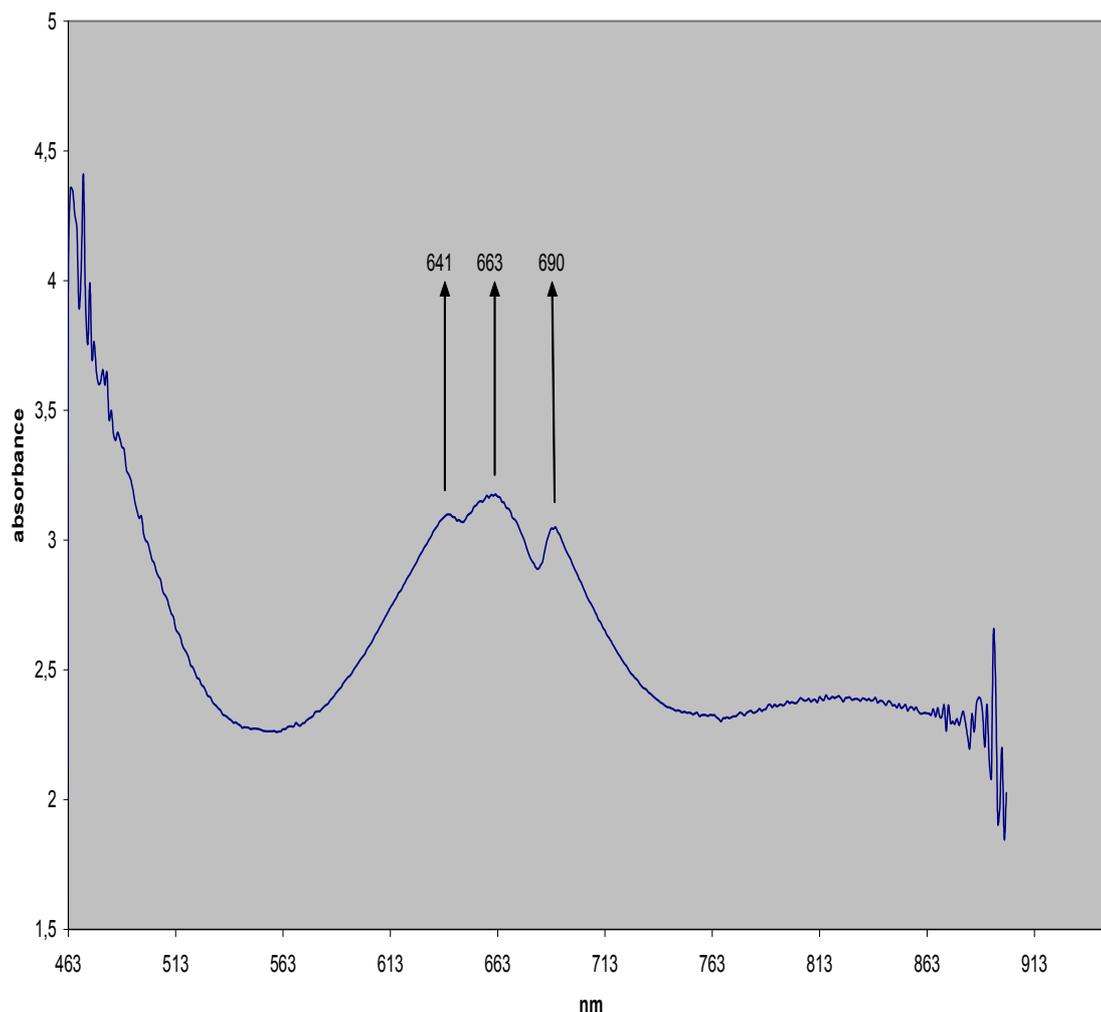
Ca	Mg	Si ₂	O ₆	
Nb atomes	1	1	2	6
Donc	10%	10%	20%	60%

IV.2.2 Spectrométrie UV-VIS-PIR

Pour le positionnement des échantillons, on donnera la position utilisée pour chacun des trois diopsides étudiés ci-dessous :

-Pour le diopside chromifère étoilé cabochon, on fait passer le faisceau sur le côté non facetté de la gemme, pour le diopside facetté chromifère on fait passer le faisceau par la culasse de la gemme et enfin pour le diopside du Pakistan, on passe le faisceau sur la face ou une rayure de 90° au coin droit apparaît.

Figure N°21 : Spectre uv-vis-pir du diopside Cr étoilé (échantillon N°1)



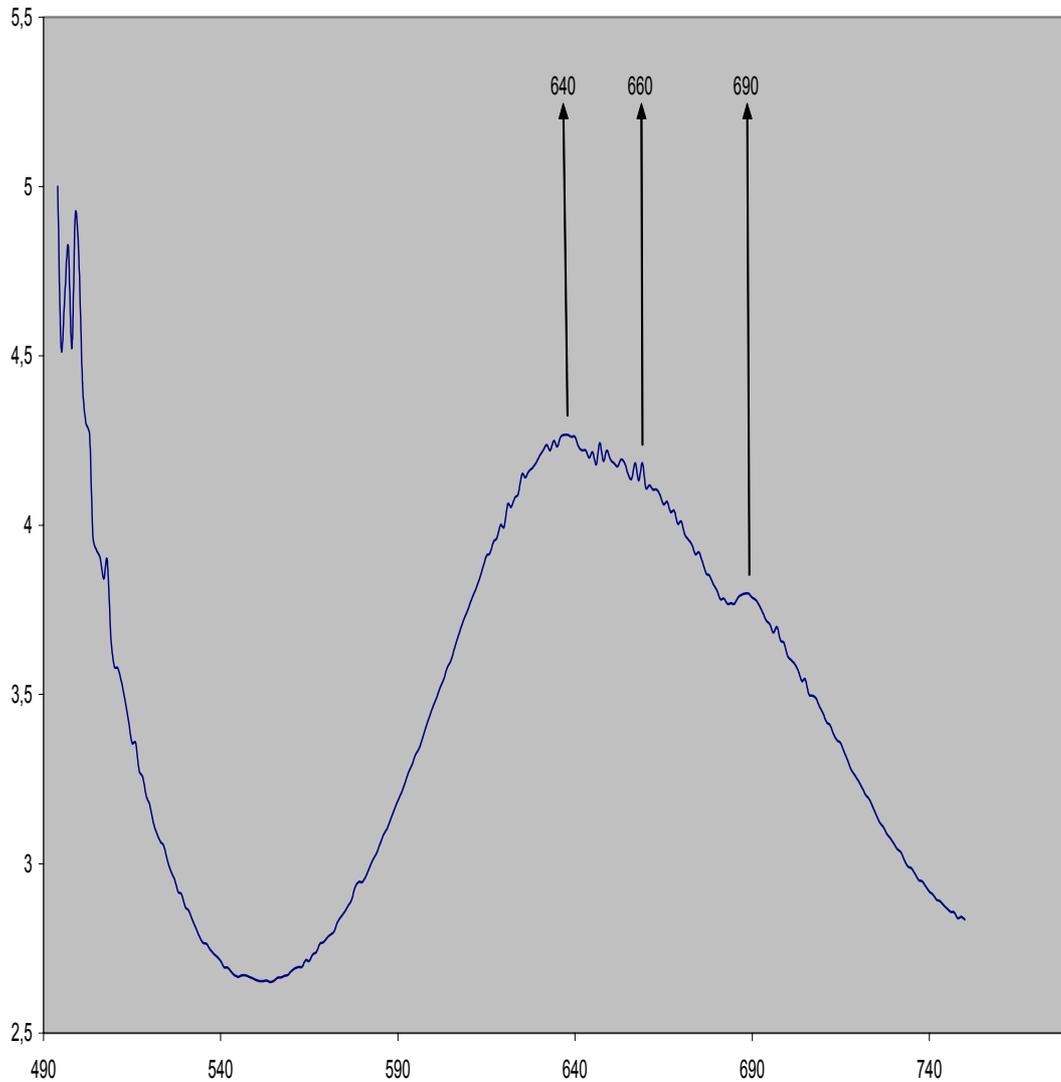
On sait que la couleur verte a un domaine en longueur d'onde qui varie entre 520nm et 565nm. On remarque très nettement sur ce spectre (fig.21) que c'est l'endroit où l'absorbance est la plus faible.

Ce schéma correspond à la courbe a de la fig.3 qui montre nettement les trois bandes caractéristiques de l'ion chrome à 641, 663, 690 nm (fig.21).

Pour le second spectre concernant le diopside chromifère facetté, on a eu beaucoup plus de mal à positionner l'échantillon car celui ci était facetté en taille navette.

On obtient donc le spectre suivant:

Figure N°22 : Spectre uv-vis-pir du diopside Cr facetté (échantillon N°6)



Le résultat obtenu correspond à la courbe c (figure 3) qui ne montre pas aussi nettement les trois bandes caractéristiques de l'ion chrome, mais on note des bosses plus discrètes à 690, 660 et 640 nm (fig.22). Cependant on remarque bien que l'absorbance est très faible dans la zone "dédiée" à la couleur verte. On aurait pu scier la gemme pour obtenir deux lames à faces parallèles mais on s'en est abstenu car c'était une belle gemme.

D'après les figure 21 et 22, les trois bandes entre 630 nm et 700 nm sont caractéristique de la marque de l'ion Cr_3^+ . On retrouve la même chose sur notre spectre diopside chromifère étoilé, et ceci nous confirme bien que la couleur de notre gemme est bien due à l'ion chrome. Les maximums des trois bandes se trouvent sur les points suivants (641nm, 663nm, 690nm).

La figure N°23 nous montre le transfert de charge entre les ions Fe^{2+} et Fe^{3+} . Malheureusement on n'a pas pu analyser les diopsides ferrifères qu'avec un spectromètre ayant pour détecteur un photomultiplicateur et donc l'analyse a été faite entre l'intervalle [200nm, 900nm], on ne peut voir donc que la première bande qui apparaît très clairement dans le spectre du diopside du Pakistan, Fig.25. On peut la voir aussi dans le diopside chromifère étoilé (on voit son maximum dans les deux spectres aux environs de 810nm, fig.23).

Figure N°23 : Spectre uv-vis-pir du diopside du Pakistan (échantillon N°5)

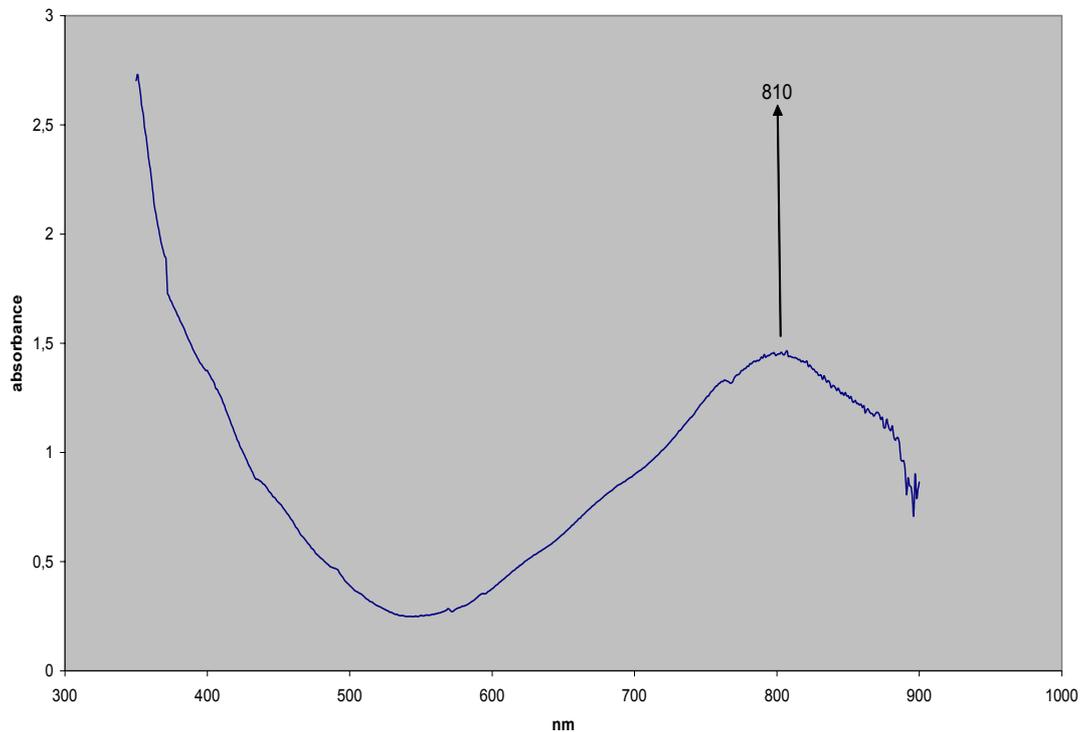
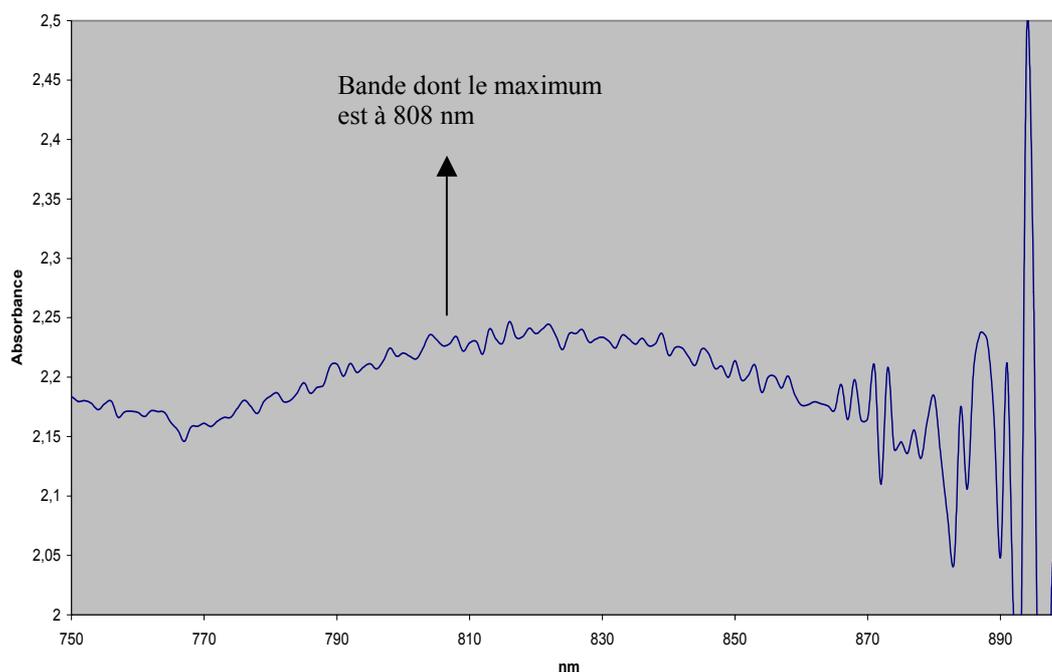


Figure N°24 : Spectre uv-vis-pir du diopside chromifère (échantillon N°1)



Dans ces deux spectres, on peut aussi noter que l'absorbance dans le vert est très faible.

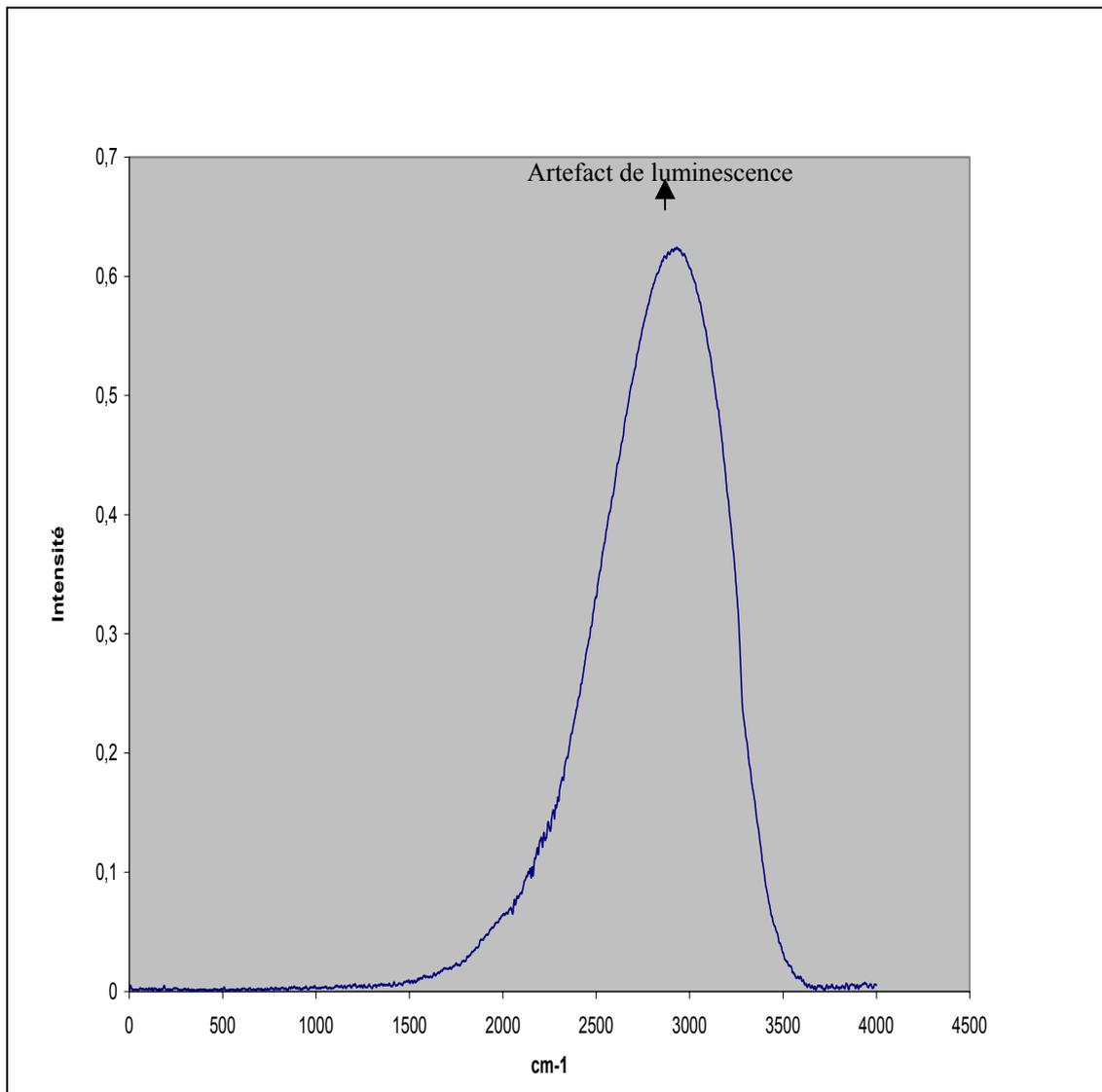
Enfin, on a aussi analysé le diopside d'Asbestos (Québec), où rien d'intéressant n'apparaît à part une bande dans les 460 nm.

IV.2.3 Spectrométrie Raman

On a obtenu des résultats mitigés. En effet, peut être les diopsides ferrifères et chromifères ramanisent apparemment très mal, cela est dû à la fluorescence, il fallait sûrement les passer au FT Raman, mais par manque de temps cela n'a pas été possible.

On a obtenu un résultat très semblable pour tous ces spectres, en voici un exemple :

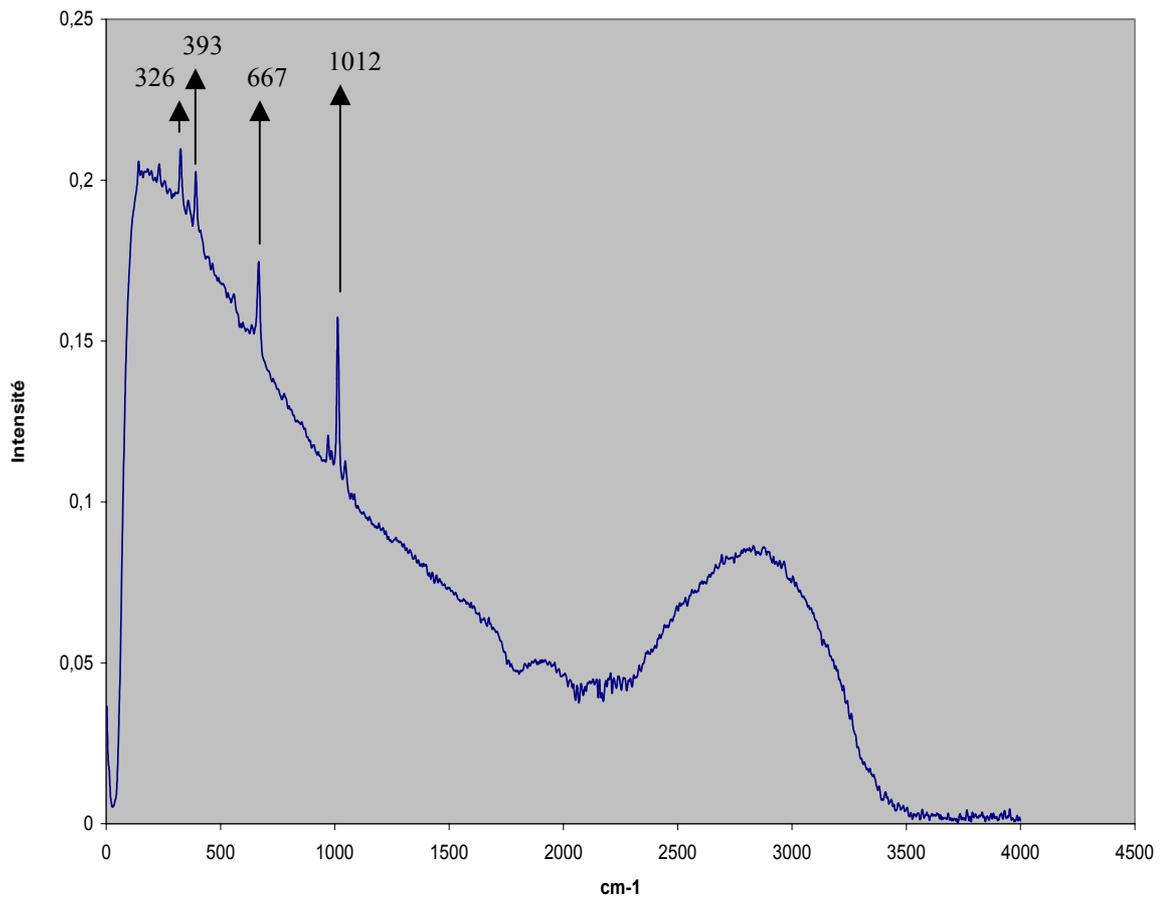
Figure N°25 : Spectre Raman du diopside chromifère



Par contre on a obtenu des résultats assez satisfaisants pour trois de nos gemmes, la violane et les deux diopsides vanadifères.

En voici les spectres ainsi que les raies principales de chaque spectre :

Figure N°26 : Spectre Raman de la violane (échantillon N°9)



Nous distinguons très bien les quatre raies principales (fig.26) :

- La principale raie à 1012 cm^{-1} -> due à la liaison Si-O
- La raie à 667 cm^{-1} -> due à la liaison Si-O
- La raie à 393 cm^{-1} -> due à la liaison Ca-O
- La raie à 326 cm^{-1} -> due à la liaison Mg-O

Cela correspond bien aux références données (Rossman, 2003).

Figure N°27 : Spectre Raman du diopside vanadifère (échantillon N°7)

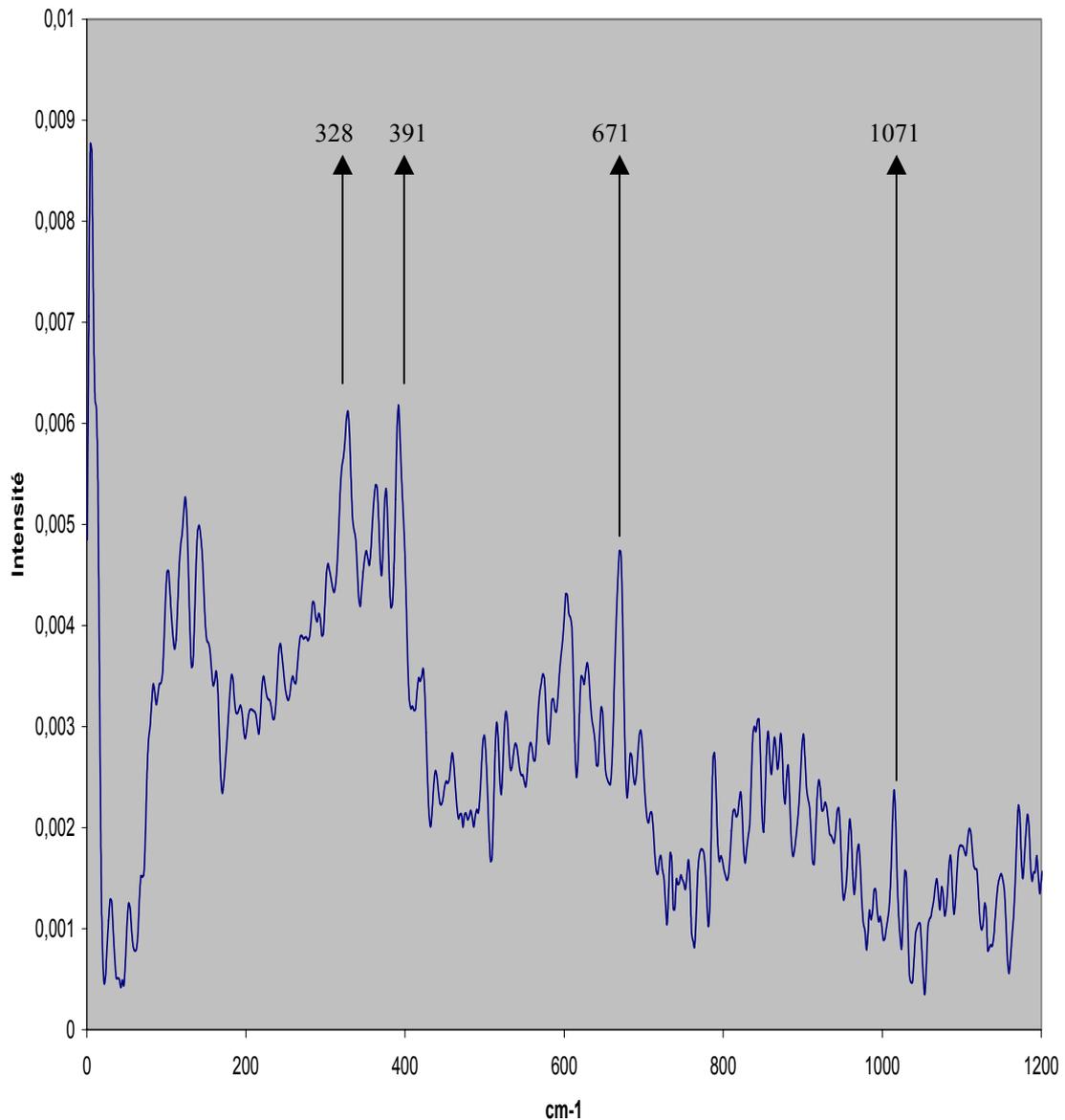


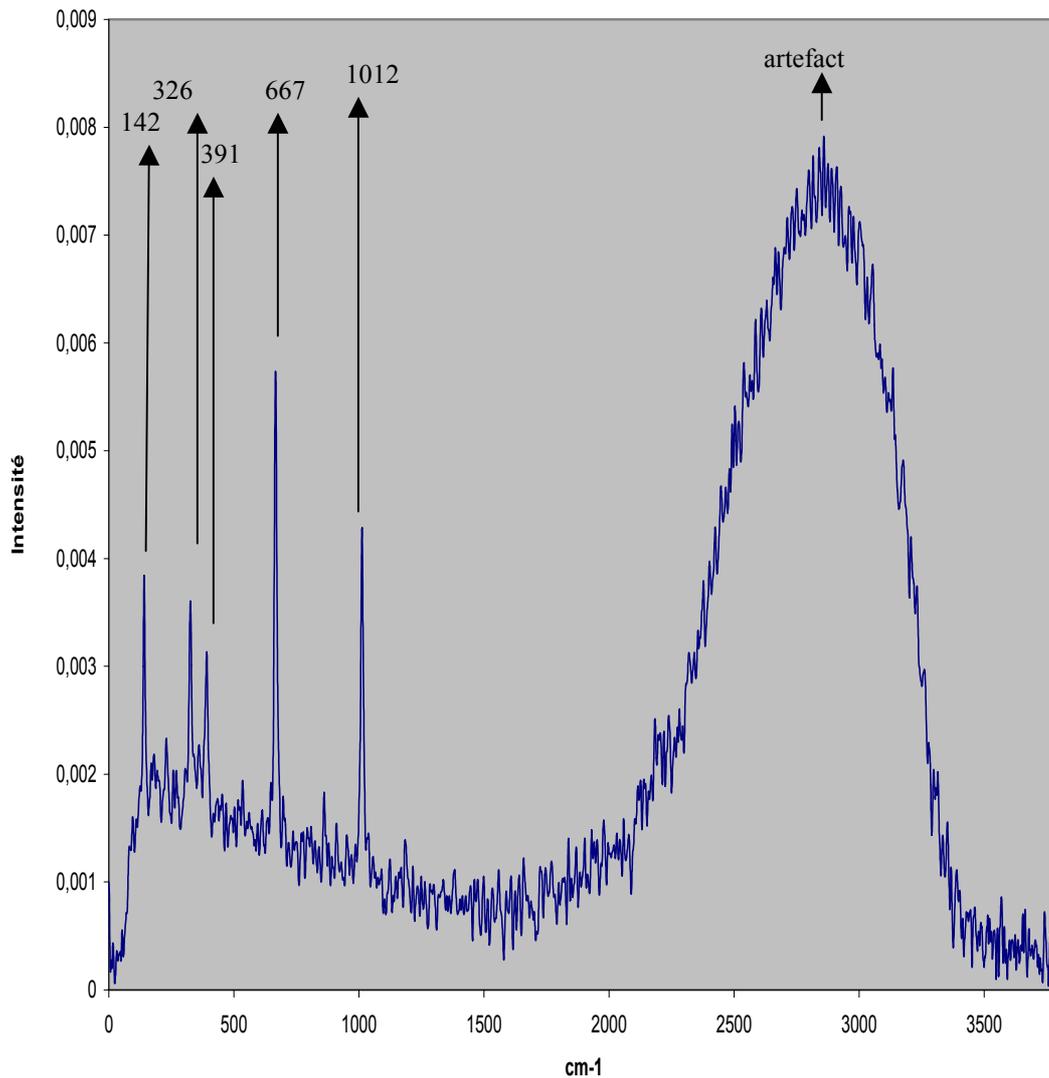
Fig.27, on a pour le premier diopside vanadifère, un signal moyen mais on arrive tout de même à repérer les raies du diopside.

- Une raie à 1014 cm^{-1} -> due à la liaison Si-O.
- Une raie à 671 cm^{-1} -> due à la liaison Si-O.
- Une raie à 391 cm^{-1} -> due à la liaison Ca-O.
- Une raie à 328 cm^{-1} -> due à la liaison Mg-O.

On peut dire sans aucune hésitation que cela correspond bien à du diopside.

Le spectre du deuxième diopside vanadifère est de meilleure qualité :

Figure N°28 : Spectre du diopside vanadifère (échantillon N°8)



On distingue très nettement nos quatre raies et une cinquième se situant à 142 cm-1.

- La raie principale est à 667 cm-1 -> due à la liaison Si-O.
- Une raie est à 1012 cm-1 -> due à la liaison Si-O.
- Une raie est à 391 cm-1 -> due à la liaison Ca-O.
- Une raie est à 326 cm-1 -> due à la liaison Mg-O.

On peut dire que le spectromètre Raman nous a confirmé que la gemme étudiée lorsqu'elle ne ramanisait pas mal, était du diopside. Ceci étant, cet appareil aurait été plus utile pour l'analyse des inclusions supérieures au micron et qui sont très nombreuses dans le diopside, ou encore dans l'analyse de vibrations de moindre intensité mais qui peuvent nous donner des informations sur l'origine géographique de la gemme. Cela n'a pu être fait à cause de la perte des gemmes.

V ° Partie: Discussion

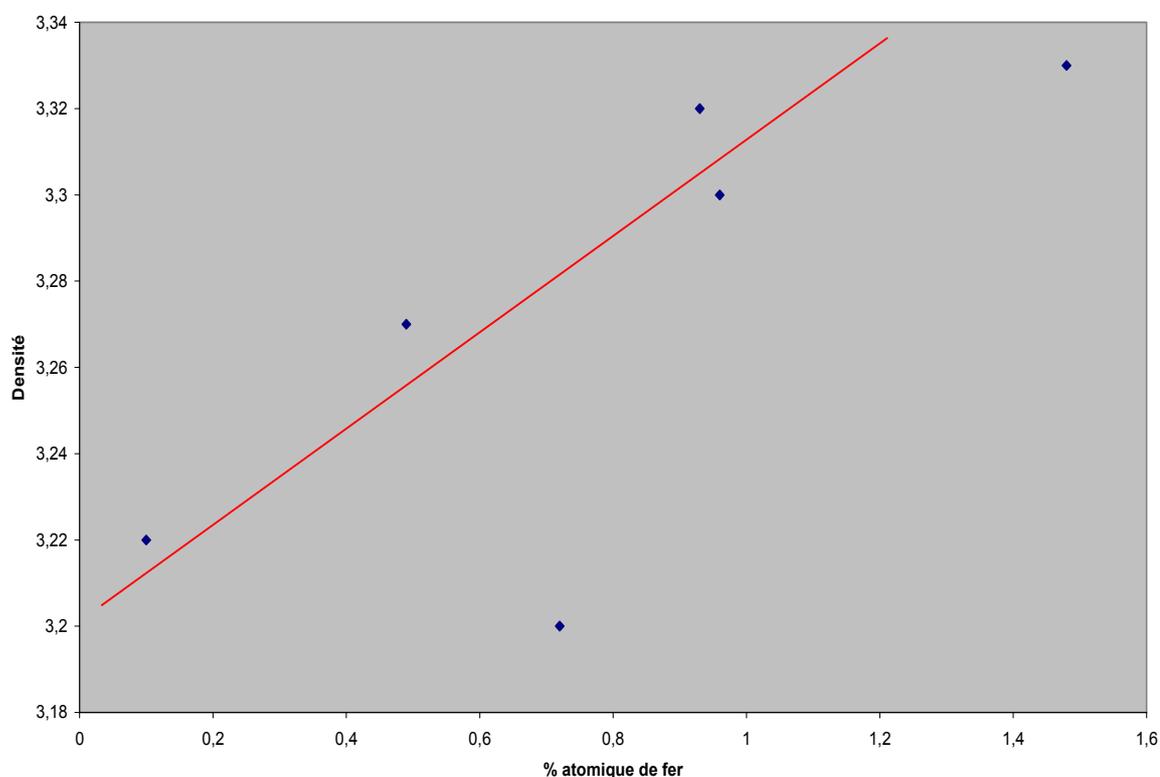
Les mesures de densité ont donné des résultats étaient conformes aux références sauf en ce qui concerne la violane. On a deux échantillons de violane l'un possédant plus de « matière blanche » que l'autre, a une densité de 2.97, celui ayant le plus de « matière blanche » à sa surface et 3.08 celui qui en a le moins. En fait la matière blanche apparaissant sur la violane est un autre minéral et sachant que les minéraux ont en moyenne une densité de 2.7, ceci explique pourquoi nous avons une densité un peu plus faible. Notre théorie est confirmée par le fait que dans l'échantillon ou le minéral blanc apparaît le moins, on a la plus forte densité.

D'après les résultats obtenus, nous pouvons aussi en déduire que les diopsides ferrifères sont les plus denses et que donc plus un diopside contient du fer plus celui-ci est dense. La densité des diopsides contenant du fer varie de 3.29 à 3.35 d'après le tableau n°2.

Celle des diopsides chromifère et vanadifère varie entre 3.20 à 3.27 ce qui laisse présager qu'ils contiennent moins de fer et cela est confirmé lors de l'analyse chimique (tableau n°4).

On remarque que les éléments qui apparaissent, sont bien conformes aux noms donnés à la pierre. Toutefois on remarquera que le fer est un élément très présent dans le diopside, ainsi plus une pierre est vert sombre plus l'élément fer est important. On voit cela assez clairement dans le tableau n°4.

Figure N°29 : représentation de la densité en fonction du % atomique de fer.



Identification des échantillons représentés figure 29 de gauche à droite :

Echantillons 7, 6, 1, 11, 5, 2.

On remarque très nettement sur la figure 29 que l'échantillon n°1 apparaît non conforme. C'est le diopside chromifère étoilé taillé en cabochon. Celui ci possède donc des canaux qui font baisser sa densité.

IV° Partie: Conclusions

Ce mémoire avait pour but de faire un petit livre dédié au diopside gemme afin de mieux connaître celui-ci, de découvrir les différentes variétés et particularités de cette gemme, ce qui n'a jamais été fait auparavant.

On a tout d'abord fait une bibliographie assez complète du diopside avant de soumettre à l'analyse nos échantillons grâce aux différents instruments de gemmologie. On a découvert des variétés peu connues en gemmologie telle la violane ou la tashmarine et fait une étude de leurs gisements.

On a ensuite utilisé les instruments de base de gemmologie avec lesquelles on a confirmé les données théoriques telle que la densité, les indices de réfractions. On a déterminé par ailleurs leur poids, vu le pléochroïsme de ces gemmes grâce au microscope optique et enfin on a étudié leur luminescence.

La luminescence du diopside vanadifère de Tanzanie est plutôt orangé voir jaune en onde longue, ceci est dû à la présence de l'ion manganèse (Mn^{2+}) comme nous le confirme l'analyse chimique.

Pour les instruments de gemmologie dits de laboratoire, on a utilisé trois instruments :

-Le microscope électronique à balayage par lequel on a obtenu des spectres de microanalyse nous a donné les éléments chimiques présents dans le minéral. On a ensuite étudié les éléments mineurs, caractéristiques de chaque gemme (Fe, Cr, Mn, Al, Na...) qui sont pour certains responsables de la couleur de la gemme. On a remarqué que plus une gemme possédait du fer plus celle-ci était d'un vert sombre.

-Pour le spectromètre Raman, il nous a tout simplement confirmé que les raies de ces spectres correspondaient bien à ceux du diopside et on a aussi étudié grâce à la théorie à quelle vibration moléculaire correspondait chacune d'entre elles.

-En ce qui concerne le spectromètre uv-visible-procheIR, on a remarqué assez logiquement que la couleur la moins absorbée dans les spectres des échantillons était le vert.

Par ailleurs, on a pu prouver de manière certaine que l'élément chrome intervenait dans la couleur du diopside chromifère facetté de Russie par l'apparition de trois bandes à 640nm, 660nm et 690nm.

Malheureusement, la perte accidentelle de nos documents ainsi que celle des gemmes nous a empêché d'analyser le minéral blanc accompagnant la violane afin de l'identifier. L'analyse de certaines inclusions au Raman aurait pu être faite.

Pour des raisons pratiques, on n'a pu utiliser qu'un spectromètre uv-visible-proche infrarouge c'est-à-dire ne pouvant aller au-delà des 900nm alors que la partie intéressante à étudier pour l'élément fer est situé entre 800nm et 1500nm, pour prouver le transfert de charge qui se produit, c'est-à-dire le passage de l'ion Fe^{2+} à Fe^{3+} .

Cela sont des voies de recherches pour l'amélioration du mémoire...

Références:

- Arem.J.E, (1987), *Encyclopedia color of gemstones*, édition van Nostrand Reinhold Company, P.82-83.
- Aubouin.J, Brousse.R, Lehman.E.J.P (1975), *Pétrologie*, 2nd édition Dunot, p.132-140.
- Bariand.P, Cesbron.F, Geffroy.J (1977), *Les minéraux, leurs gisements et leurs associations*, volume1, édition minéraux et fossiles, p.93-96.
- Bariand.P, Poirot.J.-P (1998), *Larousse des pierres précieuses*, p.142-143.
- Battey.M.H, (1972), *Mineralogy for student*, édition Oliver and Boyd, p.256-257 et 260.
- Deer W.A, Howie R.A, Zussman J, (1992), *The rock forming minerals*, 2nd édition, P.42-74 et p.170- 176.
- Devismes.P (1978), *Atlas photographique des minéraux d'alluvions*, p.39-41.
- Duda.R, Rejl.L, Slivka.D (1986), *La grande encyclopédie des minéraux*, édition grund, p.398, 399.
- Gubelin.E.J, Koivula.J.I (1986), *Photo Atlas of inclusions of gemstones*, édition ABC Zurich, page total 650
- Hurwit K.N (1984), *Gem Trade lab notes: Diopside*, p.107.
- Koivula J.I, Kammerling R.C (1989), *Gem News: Colour stones update from China*, p.111-112.
- Koivula J.I, Kammerling R.C, Fritsch E (1994), *Gem Neros: Russian Uvarovite garnet and other Russian materials*, p.54.
- Koivula J.I, Kammerling R.C (1991), *Gem News: Attractive Tanzanian diopside*, p.254.
- Koivula J.I, Kammerling R.C, Fritsch E (1992), *Gems and Gemmology*, p.201.
- Lameyre J (1986), *Les minéraux dans les roches*, édition Doins éditeurs Paris, p.87-91.
- Lasnier.B, *Matériaux de l'écorce terrestre*, Polycopié de l'université de Nantes, p.113-114 et 117 à 122.

-Rossman G.R, Mineral Spectroscopy Server. <http://minerals.gps.caltech.edu/>.
Mise à jour du 12 Avril 2001.

- Shor R, Quinn E (2002), *Gems News International*. “Tashmarine”: Diopside from central Asia, *Gems and Gemology*, vol.38 n°8, p.261, 262.

- Schumman.W, (2000), *Guide des pierres précieuses*, Delachaux et Niestlé, Paris, p.22-25, 31,190.

- Webster.R (1970), *Gems: their sources, descriptions and identification*, Butterworth and co, 2nd edition, p.263-264.

- <http://www.mineral.galleries.com/mineras/silicate>

-<http://www.gemmology.org>

-<http://www.users.swing.be/lateliordor/pierres>

-<http://www.theimage.com/mineral/diopside/index.htm>

-<http://www.mindat.org/show.php>

-<http://www.mineralminers.com/html>